

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Optimització en termes econòmics del procés de
recàrrega d'un vehicle elèctric**

MEMÒRIA

Autor: Miquel Aymat Fortuny
Director: Oriol Boix Aragonès
Convocatòria: Maig 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte és una proposta de tot un seguit de metodologies potencialment aplicables en el procés de recàrrega d'un vehicle elèctric amb el principal objectiu de reduir-ne el seu cost econòmic, tractant de no incidir en els hàbits d'utilització del vehicle per part del seu usuari.

En primer lloc, es planteja la situació actual en matèria de recàrrega de vehicles elèctrics, les seves peculiaritats, avantatges i inconvenients, així com les normatives que ho regulen.

Seguidament, i basant-se en les dades estadístiques que aporten diferents estudis i institucions públiques, es presenta un escenari d'ús típic del vehicle elèctric que servirà per justificar l'elecció de la tarifa elèctrica.

A continuació, s'identifiquen un seguit d'oportunitats d'optimització del procés de càrrega que serviran com a punt de partida per definir les diferents propostes de resolució.

Per últim, es plantegen i descriuen les propostes de millora en forma de metodologia que caldria aplicar per tal d'assolir l'objectiu de reducció del cost econòmic del procés de recàrrega. En aquest punt, es duen a terme alguns exemples pràctics per il·lustrar els avantatges dels models plantejats.

Adicionalment a aquestes propostes, es presenta una idea de control de recàrrega amb l'objectiu de perllongar la vida útil de la bateria, fent ús d'alguns dels instruments utilitzats en les metodologies anteriors, que seria perfectament integrable en qualsevol de les propostes.

Com a conclusió, es determina que s'han arribat a obtenir propostes amb una capacitat potencial de reducció del cost que suposa la recàrrega d'un vehicle elèctric que es podrien aplicar i adaptar a diferents escenaris. Aquestes propostes es consideren viables, factibles i suficientment robustes a les possibles modificacions legislatives.

Sumari

1. GLOSSARI	6
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte	7
2.2. Motivació	9
2.3. Requeriments previs	9
3. INTRODUCCIÓ	10
3.1. Objectius del projecte	10
3.2. Abast del projecte	10
4. LA RECÀRREGA DEL VEHICLE ELÈCTRIC	11
4.1. Introducció	11
4.2. Normativa i estandardització	12
4.3. Principis bàsics del procés de recàrrega	16
5. ALGORITMES I MODES DE FUNCIONAMENT	18
5.1. Introducció	18
5.1.1. Justificació de l'escenari escollit	19
5.1.2. Justificació del tipus de mercat escollit	20
5.1.3. Justificació de la tarifa escollida	20
5.2. Control dinàmic de recàrrega en funció de la intensitat disponible	25
5.2.1. Situació actual	25
5.2.2. Plantejament de la solució	27
5.2.3. Altres casos d'aplicació de la solució	28
5.3. Control horari simple de la recàrrega	30
5.3.1. Situació actual	30
5.3.2. Plantejament de la solució	30
5.4. Control dinàmic de la recàrrega en combinació amb una instal·lació fotovoltaica	31
5.4.1. Situació actual	31
5.4.2. Plantejament de la solució	33

5.5. Control dinàmic de la recàrrega en funció del cost de l'energia	35
5.5.1. Situació actual.....	35
5.5.2. Plantejament de la solució	35
5.5.2.1. Perfil de consum de l'habitatge	36
5.5.2.2. Perfil de consum del VE	39
5.5.2.3. Preu de l'energia pel dia actual i per l'endemà	41
5.5.2.4. Algoritme	41
5.5.2.5. Exemple pràctic d'aplicació	44
5.6. Altres possibilitats pel control de la recàrrega	45
CONCLUSIONS	50
6. BIBLIOGRAFIA	52

1. Glossari

VE	Vehicle Elèctric
WTW	<i>Well-To-Wheels</i> (del pou a les rodes)
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i> (carregador de vehicle elèctric)
CAN	<i>Controller Area Network</i>
PLC	<i>Power Line Communications</i> (comunicacions mitjançant línia de potència)
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (modulació per l'amplada dels polsos)
CRO	Cable de recàrrega ocasional
REE	Red Eléctrica de España
SoC	<i>State of Charge</i> (estat de càrrega, en tant per cent)
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
INE	Instituto Nacional de Estadística
V2G	<i>Vehicle-to-Grid</i> (del vehicle a la xarxa)
OBC	<i>On-Board Charger</i> (carregador de bord)
FV	Fotovoltaica o fotovoltaiques
PVPC	Preu voluntari pel petit consumidor
CNMC	Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia
SoH	<i>State of Health</i> (vida d'una bateria, en tant per cent)
Li-Ion	<i>Lithium-ion</i> (ions de liti)
BMS	<i>Battery Management System</i> (sistema de gestió de la bateria)
DoD	<i>Depth of Discharge</i> (profunditat de descàrrega)
OTA	<i>Over-the-Air</i> (a través de l'aire, en remot)

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

La irrupció del VE (vehicle elèctric¹) està suposant tot un repte pels seus actors principals, des dels fabricants fins als usuaris, passant pel sector de la producció, emmagatzematge i distribució de l'energia elèctrica. Les vendes d'aquest tipus de vehicles i de tota la indústria de l'entorn de la mobilitat elèctrica, no han fet més que augmentar de manera exponencial durant els últims anys. La rebaixa en el cost de fabricació de les bateries amb la conseqüent rebaixa del cost de venda dels VE, la conscienciació de la societat en matèria de contaminació i els incentius d'alguns governs a aquesta forma de mobilitat menys perjudicial per a la salut de la població i del planeta, han sigut alguns dels detonants d'aquest creixement i molt probablement ho continuïn essent durant els anys que venen.

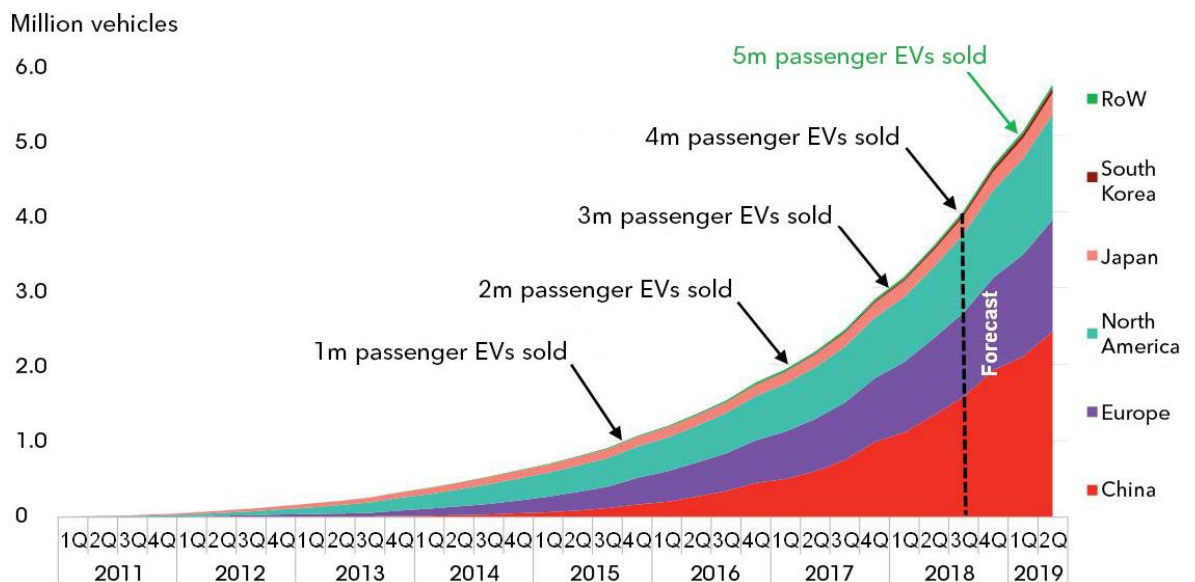


Figura 2.1. Vendes mundials acumulades de VE. Font: BloombergNEF.

¹ Tot i que per definició la paraula vehicle engloba tot mena de màquines pel transport de persones o objectes, en el context d'aquest projecte s'utilitzarà per referir-se únicament a turismes.

Tot apunta que aquesta tendència no té aturador, i és que, actualment els VE s'estan imposant clarament en matèria de mobilitat de zero emissions enfront d'alternatives com l'hidrogen, que tot i suplir les principals mancances del VE (autonomia i velocitat de recàrrega) té majors inconvenients com ara el preu, l'eficiència del WTW (*Well-to-Wheels*²), el cost per km o la xarxa de punts de subministrament.

Paral·lelament, la indústria del VE ha fet néixer una indústria auxiliar associada que, més enllà d'aportar components per a la producció del mateix vehicle, tracta de crear i subministrar nous productes que cobreixin les noves necessitats sorgides a raó d'aquesta nova forma de mobilitat. L'exponent més clar d'aquesta indústria paral·lela el trobem en els sistemes de recàrrega, un element primordial i bàsic per al funcionament i l'èxit del VE. Des de petites empreses de recent creació fins a grans multinacionals amb un llarg recorregut especialitzades en material elèctric, passant per alguns dels mateixos fabricants de VE, s'encarreguen de dissenyar i subministrar tot un ventall d'aparells que fan possible la recàrrega del VE. L'evolució d'aquests aparells és continua i les seves possibilitats van molt més enllà del que ofereix el mercat avui dia, i és aquí on es troba l'origen d'aquest projecte; en tractar d'implementar tot un seguit de millores.

Cal recordar, però, que el principi de funcionament del VE no es basa en una tecnologia que hagi aparegut recentment ni suposa una revolució o un nou descobriment en termes d'enginyeria, i és que dins de la història de l'automòbil el VE va ocupar un lloc tant o més important que el vehicle amb motor de combustió interna fins a principis del segle XX. Tot i que els primers prototips d'un VE van arribar a principis del segle XIX, no seria fins a la segona meitat de segle que començaren a aparèixer els primers vehicles elèctrics de producció, juntament amb els primers vehicles de combustió interna. A partir d'aquí, el VE es va anar imposant en alguns aspectes enfront del vehicle de combustió interna, tant pel que fa a prestacions (el primer vehicle a superar els 100 km/h va ser un elèctric, *La Jamais Contente*, Figura 2.2) com en quota de mercat (a principis del segle XX, un 38 % dels vehicles que circulaven pels carrers dels Estats Units eren elèctrics, enfront d'un 22 % de vehicles propulsats amb benzina i un 40 % a vapor). Aquest avantatge es va anar difuminant amb el pas dels anys, fins que alguns desenvolupaments tecnològics, com l'arribada del famós Ford Model T, la invenció del motor d'arrancada elèctric pels vehicles de combustió interna o la millora de la xarxa interurbana de carreteres, relegant el VE a un ús exclusivament urbà, van propiciar la desaparició d'aquest tipus de vehicles [2], [12].

² Anàlisi d'eficiència, en termes energètics, entre l'obtenció de la font d'energia primària i el treball útil obtingut a les rodes del vehicle.



Figura 2.2. "La Jamais Contente", 1899. Font: www.la-jamais-contente.e-monsite.com.

2.2. Motivació

Aquest projecte neix de l'interès del seu autor en el món del VE, que engloba dos dels camps que més l'apassionen: el de l'energia elèctrica i el de l'automoció. El fet de fusionar aquests dos camps, que en un passat no massa llunyà no acostumaven a anar de la mà, suposa tot un repte per als experts de cada una d'aquestes matèries, doncs no és estrany trobar-se amb grans entesos del món de l'automoció que desconeixen alguns dels conceptes bàsics de l'energia elèctrica i viceversa. Al mateix temps, suposa una oportunitat de futur de cara a les persones que tinguin interès a conèixer aquestes dues temàtiques, ja que en tractar-se d'una "nova" tecnologia, o més ben dit, d'una nova combinació de tecnologies amb molts anys d'història, la mobilitat elèctrica presenta tot un seguit de reptes que caldrà superar en els pròxims anys. Un d'aquests reptes és, precisament, la recàrrega del vehicle, i és que tot i haver patit una clara evolució respecte als inicis del que entendríem com a mobilitat elèctrica moderna, encara li queda molt per recórrer, tant pel que fa a la recàrrega ràpida com pel que fa a la recàrrega lenta.

2.3. Requeriments previs

Per a dur a terme aquest treball serà necessari disposar d'uns conceptes bàsics d'electrònica i d'electricitat, adquirits en les diferents assignatures que s'han cursat en la carrera. Conèixer el principi bàsic de funcionament del protocol de comunicació entre el vehicle i l'aparell de recàrrega també facilitarà la consecució del projecte. El més important, però, serà tenir clares quines són les necessitats d'un usuari de VE, les particularitats de la tarifació de l'energia en el mercat elèctric així com quina podria ser la manera de minimitzar el cost de la recàrrega d'un VE a partir del control del procés de recàrrega segons diferents paràmetres i utilitzant tot un seguit d'algoritmes.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és plantejar i desenvolupar els passos teòrics i algoritmes a utilitzar per a optimitzar el procés de recàrrega d'un VE des d'un punt de vista econòmic. Per tal d'assolir aquests objectius, caldrà plantejar-se quin és l'estat actual en el món de la recàrrega d'un VE, quins reptes planteja i quines oportunitats es poden identificar i aplicar per tal de reduir el cost econòmic que suposa la recàrrega d'un VE per part de l'usuari. Per la consecució del projecte, caldrà també tenir en compte les limitacions que es poden trobar actualment i les dades de les quals es podria disposar en un cas real, amb l'objectiu de fer d'aquest projecte una guia factible i aplicable en un cas pràctic amb els coneixements i les eines necessaris. Per últim, es proposarà la incorporació d'una millora als algoritmes plantejats per tal de maximitzar la vida útil de la bateria.

3.2. Abast del projecte

Aquest projecte se centra a donar resposta a una demanda creixent d'aparells que permetin realitzar una recàrrega intel·ligent d'un VE i més concretament, en els algoritmes que podrien operar aquests aparells en el seu funcionament. Pretén doncs presentar i plantejar tot un seguit d'algoritmes des d'un punt de vista teòric i pràctic en alguns casos, mitjançant la utilització d'alguns exemples.

Donada l'extensió que pot suposar un tema com aquest, aquest treball no pretén en cap cas donar la resposta perfecta, definitiva o ideal, sinó que tan sols vol mostrar una proposta pràctica, realista i aplicable, al mateix temps que limitada en alguns punts pels coneixements que es disposen d'algunes de les matèries que s'hi tracten, com ara en el cas de la creació de models de predicció, que s'escapen de l'abast del projecte.

4. La recàrrega del vehicle elèctric

4.1. Introducció

La recàrrega d'un VE és el procés pel qual es converteix energia elèctrica en química per emmagatzemar-la a la seva bateria. Aquest procés permet al vehicle en qüestió recuperar una autonomia que li permetrà tant desplaçar-se com alimentar els seus elements auxiliars, com ara els llums o l'aire condicionat. Tot i que existeixen altres mètodes per recuperar aquesta autonomia, com ara l'intercanvi de bateries (Figura 4.1) [7] que permet substituir la bateria descarregada per una altra de carregada en un temps menor del qual triga un vehicle de combustió a proveir-se de combustible, o noves tecnologies en matèria de bateries, que prometen recuperar l'energia mitjançant un simple intercanvi de fluid [6], el sistema de recàrrega tradicional continua acaparant la pràctica totalitat dels vehicles elèctrics del mercat.

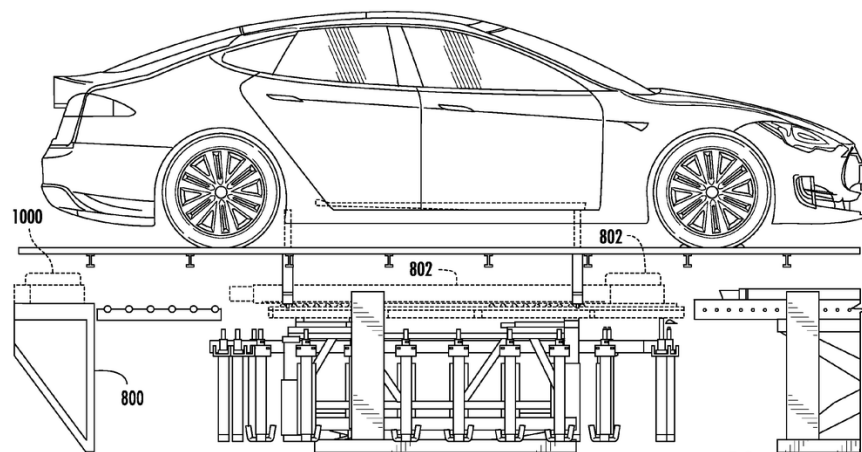


Figura 4.1. Esquema de funcionament d'un sistema d'intercanvi de bateries.

Font: Patent WO 2014/204614 A1.

4.2. Normativa i estandardització

De la mateixa manera que existeixen uns estàndards que permeten a pràcticament qualsevol vehicle de combustió abastir-se de combustible en qualsevol estació de servei, com a mínim dins del seu mercat, un VE hauria de tenir una compatibilitat similar a l'hora de recarregar la seva bateria. És per això que, com en moltes altres noves tecnologies, l'arribada del VE ha creat la necessitat de cercar l'estandardització d'alguns dels elements comuns en la majoria de VE que en formen part, com és el cas del que coneixem com a EVSE (*Electric Vehicle Supply Equipment*³).

Aquesta estandardització es duu a terme amb l'objectiu principal d'optimitzar recursos, evitar incompatibilitats i dotar al sistema d'una interoperabilitat entre productes de diferents fabricants i proveïdors. Tot i que també podríem trobar certs aspectes negatius en els processos d'estandardització, com ara el fet que poden limitar fins a cert punt la capacitat d'evolució del producte, sembla evident que aquest procés d'homogeneïtzació pot suposar molts més efectes positius que no pas negatius en una adopció massiva del VE. Les circumstàncies de cada mercat així com les necessitats i objectius de cada fabricant, però, han fet que no existeixi un estàndard o normativa única de recàrrega a escala mundial. En qualsevol cas, totes aquestes normatives comparteixen dos elements comuns en les seves especificacions: comunicacions i connector.



Figura 4.2. Connectors de recàrrega ràpida segons diferents normatives (esquerra, CCS type 1, superior CCS type 2, inferior GB/T). Font: PHOENIX CONTACT.

³ Aquest terme comprèn tots els aparells destinats a subministrar energia a un VE, majoritàriament coneguts com a carregadors de VE, siguin de corrent continu o corrent altern.

Donada la relativa complexitat així com les necessitats i possibilitats que ofereix la recàrrega d'un VE, s'estableixen una sèrie d'interaccions amb forma de comunicacions entre l'EVSE i el mateix vehicle. Aquestes comunicacions tenen com a objectiu primordial la seguretat i es realitzen mitjançant diferents mètodes, com ara el protocol CAN (*Controller Area Network*), PLC (*Power Line Communications*) o un senyal pilot entre d'altres.

Tenint en compte que el connector de recàrrega d'un VE pot tenir una tensió des de 120 V en corrent altern fins a més de 800 V en corrent continu, és essencial disposar d'un sistema que eviti que els seus contactes amb tensió siguin de fàcil accés i puguin ocasionar electrocucions i enrampades als seus usuaris. Cal tenir en compte que el VE és una eina pensada per a un públic general sense coneixements en matèria de riscos elèctrics i pot no ser plenament conscient dels riscos que podria arribar a suposar el mal ús d'un EVSE. Aquest tema és quelcom que tenen en consideració totes les normatives que fan referència a sistemes de càrrega d'un vehicle elèctric, i és per això que estableixen un protocol de comunicació que funciona amb una tensió de seguretat, que serà el que donarà l'ordre d'activar els contactes de potència i major tensió del connector de càrrega un cop hagi assegurat que aquest està correctament connectat i el vehicle sol·licita la seva recàrrega. D'aquesta manera, qualsevol connector de vehicle elèctric, sigui de la potència que sigui i sempre que es trobi en bon estat, pot ser manipulat per qualsevol usuari sense cap perill d'electrocució o enrampada.

En el cas de la recàrrega en corrent altern, per exemple, és el vehicle el que disposa de l'aparell rectificador d'alterna a continua amb la capacitat de modificar la intensitat de recàrrega. En aquest cas, el protocol de comunicació permet al sistema de recàrrega extern comunicar al vehicle quina és la seva intensitat màxima de recàrrega d'acord amb les seves especificacions. D'aquesta manera, s'evita que, per exemple, un vehicle carregui a una intensitat superior de la que podria suportar la instal·lació en la que està connectat, mitjançant, en aquest cas, una comunicació a partir d'un senyal PWM (*Pulse-Width Modulation*).

En aquest aspecte, cal tenir en compte que el VE no deixa de poder-se considerar, fins a cert punt, un aparell domèstic el qual es pot connectar en un endoll Schuko mitjançant un CRO (cable de recàrrega ocasional), amb la principal diferència, respecte a qualsevol altre aparell de l'habitatge, que la demanda de potència d'un VE (és a dir, la capacitat màxima de recàrrega del seu OBC (*On-Board Charger*)) és ostensiblement superior a la que pot arribar a proporcionar un endoll Schuko en condicions de seguretat. És per això que són necessàries aquestes mesures contemplades en els protocols i normes que eviten provocar demandes de potència per sobre de les que l'endoll al que està connectat el VE podria suportar.



Figura 4.3. Cable de recàrrega ocasional d'un VE. Font: Renault.

Un dels altres avantatges de disposar d'aquesta capacitat de comunicació entre el vehicle i l'aparell de recàrrega és el de poder aturar la recàrrega abans de procedir a la desconexió física del connector del vehicle. Cal tenir en compte que la recàrrega d'un vehicle elèctric pot consumir un corrent elevat, de l'ordre de més de 30 A en corrent altern o de fins a més de 600 A en corrent continu. El fet de desconectar el vehicle en tensió, interrompent sobtadament aquesta connexió, podria ocasionar un arc elèctric entre els contactes amb tensió del vehicle i del connector, que, a banda de desgastar-los reduint-ne conseqüentment la seva vida útil, podria arribar a provocar un incendi. Si abans de procedir a la desconexió física del vehicle s'atura la recàrrega, evitant la desconexió amb tensió, es pot reduir substancialment aquest desgast prematur.

La definició del connector també juga un paper important en aquest apartat, i és que la majoria disposen d'un sistema de bloqueig físic un cop estan connectats que evita la seva desconexió immediata. Per poder desbloquejar-lo cal realitzar una acció, ja sigui mecànica, com polsar un botó disposat en el mateix connector, o digital, com ara que el vehicle envii l'ordre de desbloqueig un cop consideri que ha finalitzat la recàrrega.

En funció de la complexitat i el nivell, el protocol de comunicacions entre el VE i el sistema de recàrrega pot permetre realitzar funcionalitats més avançades que van més enllà del que es podria considerar com al simple procés de recàrrega bàsic del VE. Fins el dia d'avui, aquestes funcionalitats es veuen pràcticament limitades als protocols de recàrrega ràpida dels VE, és a dir, la que es du a terme amb corrent continu, i permeten entre d'altres obtenir una de les dades més interessants en el procés, l'estat de càrrega. Actualment, però, s'està desenvolupant una nova norma per regular les comunicacions entre VE i sistema de

recàrrega, anomenada ISO 15118 amb l'objectiu d'implementar noves funcionalitats en un futur també en la recàrrega en corrent altern, com ara el V2G (*Vehicle-to-grid*) o el *Plug & Charge*⁴.



Figura 4.4. Carregador ràpid. Gràcies al protocol de comunicació que utilitza, permet mostrar l'estat de càrrega del VE en la pantalla del carregador. Autor: Bjørn Nyland.

Més enllà de la normativa que regula els aspectes de les comunicacions per dur a terme el procés de recàrrega o la forma física dels connectors, existeix també una regulació referent a quins han de ser els requisits a complir per la instal·lació associada a l'EVSE, és a dir, la que està compresa entre el punt de recàrrega i l'escomesa de la que s'alimentarà.

En el cas d'Espanya, aquesta norma és una instrucció tècnica complementaria al reglament electrotècnic de baixa tensió, coneguda amb el nom d'(ITC) BT 52 i dictada pel Reial decret 1053/2014 de 12 de desembre de 2014 [9]. A grans trets, aquesta normativa regula com han de ser les instal·lacions, ja siguin públiques com privades, pel que fa a elements de seguretat a incorporar, configuracions de recàrrega amb múltiples EVSE, etc.

⁴ Funcionalitat que permet la identificació automàtica del VE per part del sistema de recàrrega, mitjançant la comunicació establerta pel port de recàrrega. D'aquesta manera es pot iniciar la sessió de recàrrega automàticament i, si és necessari, gestionar el cobrament, sense haver de fer ús de cap classe d'identificació auxiliar per part de l'usuari que el seu propi VE.

4.3. Principis bàsics del procés de recàrrega

Per definir els processos de recàrrega dels VE cal fixar-se en primer lloc en els sistemes o configuracions que s'utilitzen per dur a terme la recàrrega. Únicament existeixen dos mètodes per recarregar un VE, abastint-lo a partir d'una xarxa que li proporcionï corrent altern o corrent continu (Figura 4.5), i la diferència principal entre ambdós sistemes acostuma a ser la potència de recàrrega assolible en el procés.

Tenint en consideració que l'única forma en què podem emmagatzemar energia elèctrica és en corrent continu, que els VE disposen de bateries per emmagatzemar energia elèctrica i que la xarxa de distribució és en corrent altern, és lògic pensar que caldrà convertir el corrent en algun punt del procés per tal de poder emmagatzemar l'energia dins les bateries. Amb aquest objectiu existeixen els carregadors de bateries, que s'encarreguen de rectificar el corrent i adequar-ne alguns dels seus paràmetres per poder dur a terme el procés de manera segura per a la bateria. Aquests aparells d'electrònica de potència tenen un cost, pes i volum relatiu a la potència que són capaços de rectificar. Això fa que, per una qüestió econòmica, de pes i d'espai, no es puguin equipar carregadors d'alta potència en els VE, de tal manera que, amb alguna excepció, aquests acostumen a equipar OBC (*On-board charger*) de potències de fins a un màxim d'uns 22 kW. D'aquesta manera, és possible recarregar el VE en pràcticament en qualsevol endoll, des de domèstics fins als de tipus industrial, encara que sigui a potències relativament baixes, sense la necessitat d'una costosa instal·lació o infraestructura addicional, expandint així les possibilitats de recàrrega del VE.

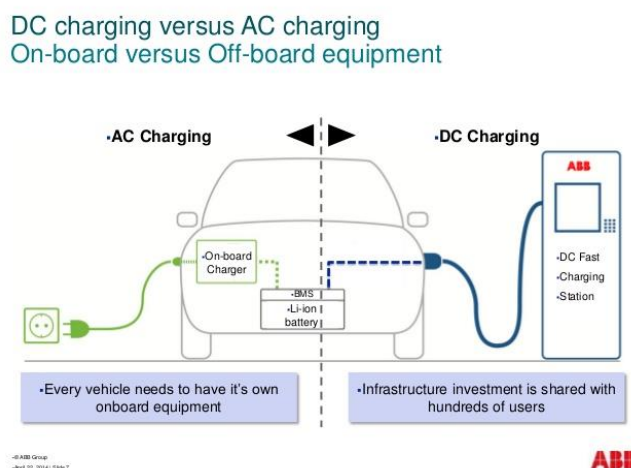


Figura 4.5. Representació de les dues configuracions possibles per a la recàrrega d'un VE.

Font: Presentació Green Vehicles Workshop - ABB, Inc

Això pot ser útil tant per a la recàrrega domèstica com per a la que es realitza, per exemple, en la via pública o en qualsevol establiment privat en el que el propietari no ha de dur a terme una elevada despesa per a realitzar la instal·lació que pot fer possible la recàrrega d'un VE, doncs en té prou amb instal·lar els aparells que proporcionin corrent altern ja que el component de major cost vindrà embarcat en el mateix vehicle.



Figura 4.6. OBC del fabricant MAHLE. Font: MAHLE.

Tot i això, també pot ser molt interessant en segons quins casos disposar de potències de recàrrega més elevades que les que és capaç de proporcionar l'OBC. Per exemple, en el cas de realitzar un llarg viatge en el que es requereixi una autonomia superior a la que pot oferir la bateria del VE, caldrà realitzar una o més parades intermèdies per recuperar autonomia és probable és que l'usuari vulgui reduir aquest temps de parada per no allargar el viatge més del desitjat. És aquí on intervenen els carregadors ràpids. Aquests aparells formen part d'una instal·lació externa al VE, i s'encarreguen de convertir el corrent altern subministrat der la xarxa en corrent continu, de tal manera que el mateix VE realitza un bypass del seu OBC per tal de que l'energia pugui arribar directament a la bateria. D'aquesta manera el VE pot realitzar recàrregues a alta potència sense la necessitat d'arrossegar un OBC pesat i costós. En alguns casos aquests aparells s'agrupen en forma d'estacions de recàrrega, per tal de poder donar servei a diversos VE al mateix temps i disminuir costos d'instal·lació.



Figura 4.7. Estació de recàrrega ràpida de Tesla. Font: Tesla.

En el cas concret d'aquest projecte ens fixarem en la modalitat de recàrrega en corrent altern, ja que és el que ens ocupa en l'àmbit domèstic, per al qual plantejarem els diferents algorismes.

5. Algoritmes i modes de funcionament

5.1. Introducció

En aquesta part del treball, plantejarem i desgranarem una per una les propostes de millora per a l'optimització del procés de recàrrega d'un VE en termes econòmics. Cal destacar aquesta referència a termes econòmics, ja que l'objectiu en el que se centra és en optimitzar l'eficiència de les recàrregues des d'un punt de vista del balanç energètic, és a dir, augmentar el rendiment dels elements que formen part del procés, sinó que el que tractarem serà reduir el cost econòmic que suposa la recàrrega per part de l'usuari del VE.

Per tal de posar en context la metodologia, s'ha decidit plantejar un escenari previ tal com s'indica en els següents apartats. Val a dir que la definició de tot aquest escenari no exclou, en cap cas, la possibilitat d'aplicar algunes de les solucions aquí plantejades en altres situacions. Tot i això, s'ha volgut especificar d'es d'un inici aquest context d'escenari teòric per exemplificar i simplificar les diferents solucions i fer-les encara més comprensibles. A banda, totes i cadascuna de les consideracions plantejades conformen l'escenari més típic de recàrrega d'un VE en l'àmbit domèstic.

Per últim, cal destacar que el mercat elèctric i tota la matèria referent a producció, distribució i comercialització d'energia elèctrica i la normativa que el regula és variable, en el sentit que les seves característiques com les seves tarifes, modalitats, etc., poden veure's modificades al llarg del temps. En tractar-se l'energia elèctrica d'un bé tan essencial per a la societat moderna, la gestió d'aquesta sempre estarà més o menys lligada a decisions polítiques. Un dels exemples més recents d'aquestes variacions i actualitzacions el trobem en el Reial decret llei 1/2019, d'11 de gener [11], que va propiciar tot un seguit de propostes de canvi per part de CNMC (*Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia*). En aquest decret s'hi inclou la possibilitat de tenir diferents potències contractades en funció de l'horari o la modificació dels horaris dels diferents trams corresponents a les tarifes amb discriminació horària. Pel fet de que encara no s'ha iniciat la implementació d'aquestes modificacions i que encara hi ha algunes incerteses sobre com s'aplicarà, per a la realització d'aquest treball es considerarà vigent la legislació que aplica en la data de realització del mateix.

En qualsevol cas, es considera que, mentre es mantinguin més o menys estables les condicions d'oferta i demanda, o de producció i consum, sempre existirà aquesta modalitat de tarifació horària de l'energia, i que fins i tot és positiu que així sigui, tant per part del consumidor com per a la mateixa societat en general, ja que aquesta és la millor manera de reflectir el cost real que suposa la generació de l'energia consumida, no només econòmic sinó també mediambiental. És per això que és molt probable que les mesures aquí plantejades es puguin aplicar durant un llarg període de temps ja que difícilment aquest precepte bàsic del mercat, el preu, l'oferta i la demanda variarà en els pròxims anys, pel que es consideren les idees aquí plantejades com a suficientment robustes en el marc del funcionament del mercat de l'energia.

5.1.1. Justificació de l'escenari escollit

En primer lloc plantejarem un escenari de partida hipotètic en el que ens situarem per contextualitzar les propostes que es faran. El seguit d'algoritmes i plantejaments que vénen a continuació s'han basat en l'escenari més típic de recàrrega d'un VE. Aquest és el d'un propietari que disposa d'un VE i un punt de recàrrega vinculat al seu domicili, ja estigui situat en un habitatge unifamiliar o en un aparcament comunitari, tenint en aquest últim cas la instal·lació de recàrrega alimentada a través del mateix comptador que alimenta l'habitatge. Amb comptades excepcions, aquest és l'escenari de recàrrega habitual majoritari de propietaris de VE, doncs és en aquests punts en els que els usuaris realitzen el major nombre de recàrregues en percentatge en comparació amb a la resta de punts, com podrien ser els de la via pública, els de centres comercials, els del lloc de treball, etc. És a dir, d'on prové la majoria d'energia que consumirà el VE durant tota la seva vida útil i on hi ha més marge de reducció del cost (Figura 5.1).

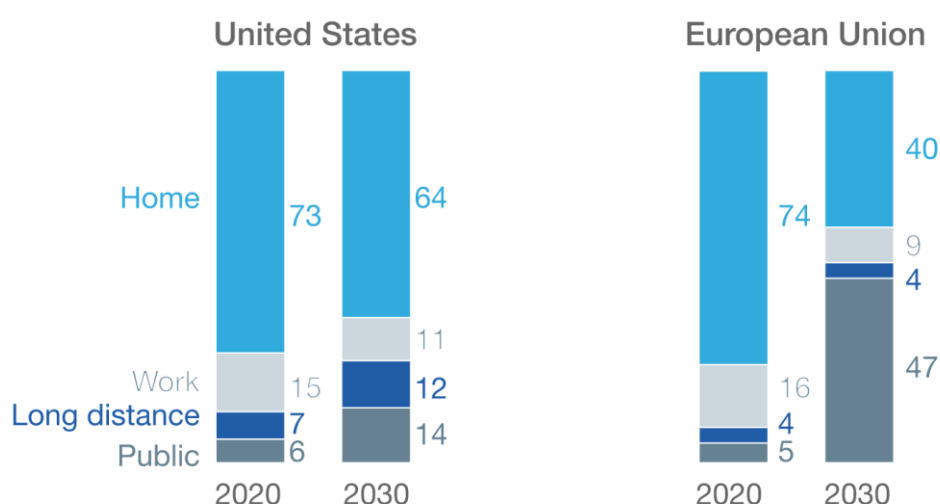


Figura 5.1. Distribució de les situacions de recàrrega d'un VE en termes energètics.

Font: McKinsey & Company.

5.1.2. Justificació del tipus de mercat escollit

El segon tema que tindrem en consideració serà el mercat al que ens acollirem. A Espanya existeixen actualment dos mercats per a la comercialització d'energia elèctrica, el mercat lliure i el mercat regulat. Mentre que en el primer són les empreses comercialitzadores les que escullen la manera amb la que volen oferir les seves tarifes, amb tot un ventall d'opcions disponibles, així com el preu al que volen vendre l'energia, el cost del terme de potència, etc., en el segon els marges estan regulats per Reial decret, oferint al consumidor el que es podria entendre com a un preu de cost de l'energia del mercat majorista, amb un petit recàrrec fixat per l'estat com a marge per a la comercialitzadora.

Per a la realització d'aquest treball ens centrarem en el mercat regulat, ja que és el més fidel al cost real de l'energia i, en la gran majoria de casos, el que brinda millors oportunitats de preu així com de reducció de costos econòmics.

Una de les principals característiques d'aquest mercat per a l'àmbit domèstic, és que el cost de l'energia subministrada es regeix pel que es coneix com a PVPC (preu voluntari pel petit consumidor). Aquest tipus de tarifació comporta que el preu que paga el client per l'energia que consumeix és directament el cost que li suposa a la seva comercialitzadora obtenir aquella energia en el mercat amb un petit marge, amb la particularitat que aquest preu varia cada hora. Aquest és un model que coincideix amb el tipus de tarifació que es realitza en altres països amb legislacions més o menys similars a l'espanyola en aquest aspecte. Això suposa un valor afegit per al projecte, ja que els plantejaments no són únicament aplicables al mercat local, sinó a molts d'altres que segueixin un sistema similar de tarifació de l'energia, amb les seves adaptacions.

5.1.3. Justificació de la tarifa escollida

El mercat regulat ofereix fins a tres modalitats diferents de tarifa d'entre les considerades de baixa tensió amb una potència contractada inferior a 10 kW. Aquestes tarifes es coneixen com a 2.0 A, 2.0 DHA i 2.0 DHS i es diferencien únicament en el cost relatiu de cada una d'elles en diferents trams horaris. Mentre que el cost del terme horari d'energia per a la tarifa 2.0 A es manté dins d'uns marges durant tota una jornada tot i tenir certa variabilitat, els de les tarifes 2.0 DHA i 2.0 DHS es veuen clarament dividits en dos i tres trams, respectivament.

A continuació es presenta un estudi conceptual, basat en dades estadístiques, obtingudes de diferents informes i organismes públics amb tal de fixar quina de les tres tarifes s'ajusta millor a les demandes d'un usuari de VE tipus.

En primer lloc s'ha calculat, per a l'any 2019, quin va ser el preu mitjà del terme d'energia per a cada hora i cadascuna de les tarifes estudiades. Per això, s'han obtingut les dades diàries del cost horari de l'energia per a cada dia de l'any al web oficial de REE (*Red Eléctrica de España*) [8] i s'ha dut a terme un càlcul del cost mitjà de cada hora del dia, és a dir, de les 0 a les 23 h.

Per tal d'obtenir una imatge comparativa més clara de les dades, s'ha representat en un gràfic el resultat obtingut.

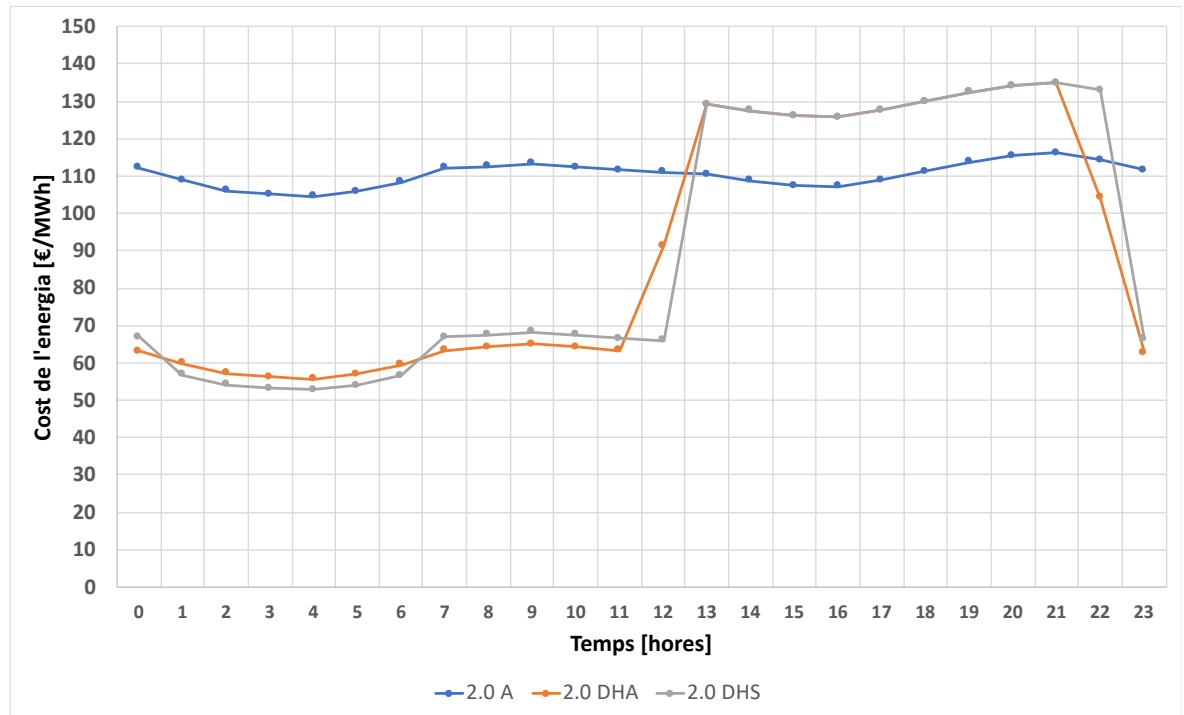


Figura 5.2. Cost mitjà de l'energia per cada franja horària i segons cada tarifa durant l'any 2019.
Font: Elaboració pròpia.

Observant la Figura 5.2 es pot deduir quines són les franges horàries de les tarifes 2.0 DHA i 2.0 DHS. Tal com es pot observar hi ha dos punts singulars en la corba de la tarifa 2.0 DHA corresponents a les 12 i les 22 h que es justifiquen pel fet que l'horari d'aquesta tarifa es veu modificat dos cops l'any, coincidint amb els canvis horaris d'estiu i d'hivern. En el gràfic, però, es representa el valor mitjà sense tenir en consideració aquest canvi d'horari. En el cas de la tarifa 2.0 DHS, en canvi, l'horari es manté invariant durant tot l'any.

Seguidament, s'ha revisat quin és el perfil de consum mitjà d'un habitatge. Segons l'informe de l'IDAE (*Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía*) titulat "Análisis del consumo energético del sector residencial en España" [4] el consum mitjà anual d'electricitat d'un habitatge a Espanya se situa en 3487 kWh. D'aquests, un 47,4 % és a dir 1653 kWh, corresponen a consums que podríem considerar pràcticament constants (frigorífic 30,6 %, congelador 6,1 %, *standby* 10,7 %). Si tenim en compte que un any té 8760 hores, calculem la potència mitjana que suposa aquest consum:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1653 \text{ kWh}}{365 \cdot 24 \text{ h}} = 188,7 \text{ W} \quad (1)$$

Per tant, podem considerar d'acord amb l'equació (1) que la potència mitjana de base consumida per un habitatge se situa en 188,7 W.

Per altra banda, segons un estudi de la comercialitzadora Holaluz [3], s'estima que la potència contractada mitjana per un habitatge a Espanya es troba entorn dels 4,6 kW.

Si tenim en compte que la recàrrega d'un VE es duu a terme de forma majoritària durant la nit, període en el que el consum de l'habitatge és proper al mínim, podem calcular que durant aquelles hores hi ha una disponibilitat màxima de potència de 4,211 kW. Tenint també en consideració que els VE disposen d'OBC amb una capacitat màxima de recàrrega mínima del voltant de 7 kW, es pot assimilar que seria capaç de recarregar sense limitació per part del VE a 4,211 kW sostinguts.

Segons la "Encuesta de Hogares y Medio Ambiente, 2008" realitzada per l'INE (*Instituto Nacional de Estadística*) [5], la distància mitjana anual recorreguda per un vehicle l'any 2008 va ser de 12562,9 km, el que equival a una mitjana de 34,42 km al dia. Si tenim en compte que el consum mitjà d'un VE⁵ es pot situar en uns 16 kWh cada 100km, es pot considerar que l'energia mitjana necessària a recuperar diàriament per un VE serà de 5,5 kWh.

Tenint en consideració les dades obtingudes en els dos paràgrafs anteriors, disponibilitat màxima de potència i energia necessària a recuperar diàriament per un VE, deduïm que **en aquest escenari seria necessari un temps d'una hora i vint minuts per tal de realitzar la recàrrega del VE.**

⁵ Consum en corrent altern del Tesla Model 3 LR AWD segons l'EPA (*Environmental Protection Agency*), el vehicle elèctric més venut a Espanya l'any 2019 i un dels més venuts del món

Aquest exercici no pretén en cap cas demostrar que la majoria de propietaris en tindran prou amb recarregar diàriament el seu VE durant tan sols 80 min per recuperar l'energia consumida en cada jornada, sinó que s'ha fet amb l'objectiu de fer veure que, tot i requerir una quantitat important d'energia elèctrica per a la recàrrega del vehicle, això no té per què significar que el VE necessiti de moltes hores per completar la recàrrega.

En qualsevol cas, ajustant els paràmetres utilitzats podem obtenir diferents resultats. Per exemple, encara que la potència mitjana contractada se situï entorn a 4,6 kW, la realitat és que en la majoria de casos aquesta està per sobre de la realment necessària, de tal manera que pot ser convenient disminuir-la per tal d'optimitzar el cost que suposa el terme de potència. Igualment, els usuaris de VE acostumen a recórrer una distància mitjana anual superior a la de la resta de vehicles, de manera que per realitzar un estudi més acurat caldria tenir també en compte aquestes particularitats.

Tornant al cas plantejat a partir de les dades estadístiques obtingudes, s'observa que la quantitat calculada per suplir la demanda diària d'energia d'un VE suposa 2007 kWh en termes anuals, corresponents a un consum mitjà de 5,5 kWh, és a dir un 36,7 % del consum anual d'un habitatge si es considera que aquesta consumeix 3487 kWh sense tenir en compte el del VE.

Tenint en compte les dades obtingudes fins al moment, passem ara a calcular el cost que suposaria, en aquest escenari, el terme d'energia de la factura d'un habitatge en cada una de les diferents tarifes. Per això, considerarem que la recàrrega del VE es duu a terme amb un control horari i que aquesta es perllonga entre les hores de menor cost de l'energia per les a tres tarifes, és a dir, entre l'1 i les 7 h de la matinada.

Si en aquest escenari sumem el consum base al consum del VE, podrem determinar que entre l'1 i les 7 h de la matinada s'hi concentra el 44 % de l'energia total consumida per l'habitatge. Això ja ens pot donar una idea de quina serà la tarifa clarament descartable pel que fa a costos.

Fent un repartiment equitatiu del consum energètic sobrant entre la resta d'hores del dia, afegint-hi el preu del terme d'energia i ponderant el cost diari total d'aquest terme, és a dir, calculant el cost econòmic horari, obtenim la següent taula:

Taula 5-1. Càlcul del cost diari mitjà ponderat del terme d'energia segons tarifa.

Font: Elaboració pròpia.

Hora	Cost del terme d'energia [€/MWh]			Consum [kWh]	Cost del terme d'energia [€/h]		
	2.0 A	2.0 DHA	2.0 DHS		2.0 A	2.0 DHA	2.0 DHS
0	112,19	63,08	67,00	0,47	0,0525065	0,0295193	0,031357
1	108,91	59,88	56,77	1,11	0,1208947	0,0664618	0,063011
2	106,14	57,17	54,12	1,11	0,1178132	0,0634640	0,060078
3	105,09	56,17	53,14	1,11	0,1166549	0,062349	0,058987
4	104,63	55,73	52,71	1,11	0,1161366	0,0618554	0,058511
5	105,81	56,92	53,90	1,11	0,1174525	0,0631853	0,059832
6	108,42	59,57	56,54	1,11	0,1203513	0,0661195	0,062761
7	112,15	63,25	67,00	0,47	0,0524867	0,0296006	0,031354
8	112,64	64,16	67,56	0,47	0,0527148	0,0300272	0,031616
9	113,37	65,00	68,31	0,47	0,0530583	0,0304208	0,031971
10	112,46	64,18	67,41	0,47	0,0526323	0,0300352	0,031548
11	111,55	63,31	66,50	0,47	0,0522061	0,0296272	0,031120
12	111,07	91,39	66,02	0,47	0,0519808	0,0427722	0,030895
13	110,49	129,14	129,14	0,47	0,0517108	0,0604371	0,060437
14	108,83	127,47	127,47	0,47	0,0509322	0,0596565	0,059656
15	107,47	126,11	126,11	0,47	0,0502936	0,059019	0,059019
16	107,14	125,79	125,79	0,47	0,050143	0,0588693	0,058869
17	108,91	127,57	127,57	0,47	0,0509714	0,0597018	0,059701
18	111,31	129,99	129,99	0,47	0,052094	0,0608331	0,060833
19	113,69	132,40	132,40	0,47	0,0532089	0,0619623	0,061962
20	115,38	134,11	134,11	0,47	0,0539968	0,0627616	0,062761
21	116,18	134,93	134,93	0,47	0,0543732	0,0631494	0,063149
22	114,28	104,11	133,05	0,47	0,0534848	0,0487240	0,062269
23	111,52	62,72	66,38	0,47	0,0521928	0,0293532	0,031066
TOTAL				15,08	1,6502926	1,2299069	1,2227725

Gràcies a aquesta taula podem arribar a la conclusió de què la millor tarifa per a l'escenari plantejat serà la 2.0 DHS, ja que és amb la que s'obté un menor cost diari del terme d'energia. Tot i que és evident que aquesta tarifa és clarament més beneficiosa que la 2.0 DHA, podrien sorgir dubtes que fessin plantejar si, modificant alguns dels paràmetres fixats en la hipòtesi, com ara la potència contractada, el consum del VE o el patró de consum de l'habitatge, podria donar-se el cas que la tarifa 2.0 DHA produís un major estalvi econòmic. En tot cas, cal notar que el cost total d'una tarifa o una altra tarifa dependrà únicament del consum que es realitzi fora de la franja de les 13 a les 21 h, incloent-hi aquesta última, doncs dins d'aquest període el cost és exactament el mateix entre ambdues tarifes.

5.2. Control dinàmic de recàrrega en funció de la intensitat disponible

5.2.1. Situació actual

El terme fix de la factura de l'electricitat en el mercat espanyol és dels més elevats d'Europa, fins a suposar de l'ordre del 40 % de l'import total segons l'estudi "Posicionamiento de UNEF respecto a la definición de peajes y cargos de la UNEF" (Unión Española Fotovoltaica) [13] (Figura 5.3).

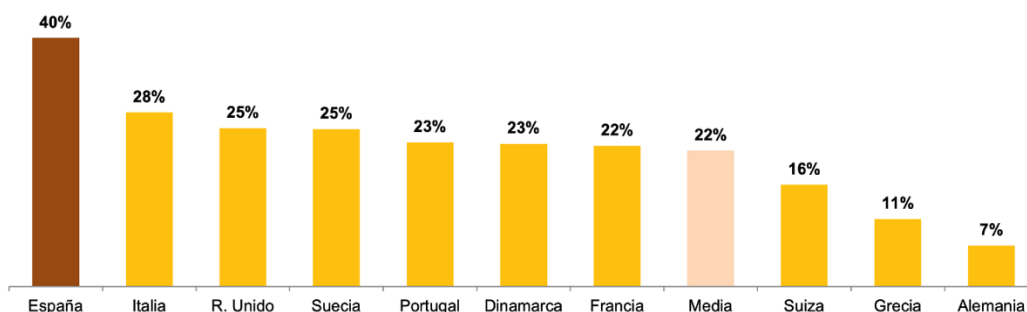


Figura 5.3. Proporció del cost del terme fix en comparació a l'import total de la factura elèctrica.

Font: UNEF [13].

El principal culpable d'aquesta situació és el terme de potència, un import fix que es factura en funció de la potència contractada i independentment de l'energia consumida. Segons aquest mateix estudi, mentre que el cost mitjà del terme d'energia de la factura s'ha reduït de l'ordre d'un 30 % en el període que va de l'any 2012 a 2019, el terme de potència ha patit un important increment de fins al 123 % tal com s'observa a la Figura 5.4.

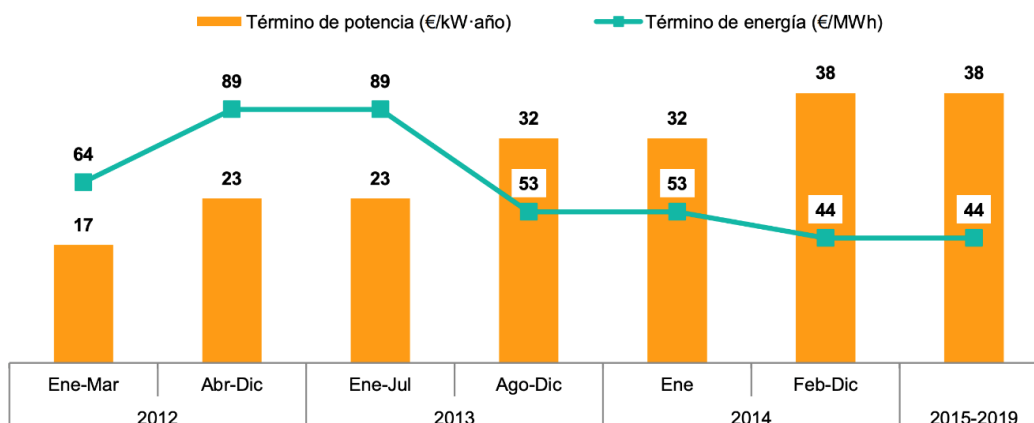


Figura 5.4. Evolució dels termes de potència i energia entre els anys 2012 – 2019.

Font: UNEF [13].

El terme de potència, amb la tarifa del mercat regulat, està fixat actualment en 38,043426 €/kW/any. A aquest terme de potència se li han d'afegir 3,113 €/kW/any com a marge per a la comercialitzadora, un 5,11269632 % corresponent a l'impost sobre l'electricitat i un 21 % d'IVA, el que acaba sumant un total de 52,34 €/kW/any o el que és el mateix, 0,1434 €/kW/dia.

És per tot això que cada cop es fa més necessari, per part de l'usuari, tractar de reduir aquest terme de potència en la mesura del possible per tal de contenir el cost total de la factura elèctrica de l'habitatge. Una manera d'aconseguir-ho és reduint els pics de potència demandada, és a dir, aplanant la corba de demanda. Per fer-ho, una alternativa pot ser substituir els aparells elèctrics de l'habitatge, com ara electrodomèstics o il·luminació, per altres de més eficients que suposin una menor demanda de potència. El mètode més efectiu, però, és tractar de redistribuir els consums per evitar l'ús simultani dels aparells que consumeixin més potència. Un clar exemple podria ser programar l'encesa de l'escalfador elèctric fora de les hores en les que s'acostumen a donar aquests pics de consum, una acció que ben gestionada, no hauria de suposar cap mena de perjudici per a l'usuari.

El fet que un sistema de recàrrega simple d'un VE es programi a una intensitat fixa, fa que sempre existeixi un cert risc de superar la potència contractada en cas que la demanda de la resta de l'habitatge sigui superior a l'esperada. Reduir la intensitat a la que recarrega el VE farà disminuir aquest risc però, per altra banda, augmentarà el temps de recàrrega. És per això que es fa necessari establir una intensitat de recàrrega de compromís, que permeti recarregar el VE en el menor temps possible assegurant que no se superarà en cap moment la potència contractada.

Si bé és cert que la recàrrega de la majoria de VE es duu a terme principalment durant la matinada, precisament perquè acostuma a ser el període en el que es concentren menys consums de l'habitatge i en el que el VE es troba a casa, el fet de carregar un VE durant les hores que estem dormint també pot suposar un risc afegit en termes de superar la potència contractada. En cas que se superés la potència contractada es produiria un tall del subministrament durant la matinada sense que l'usuari se n'adonés, fet que comportaria perjudicis tals com no disposar de l'autonomia del VE esperada, o que altres aparells d'ús continuat de l'habitatge com ara neveres o congeladors també es veiessin afectats.

5.2.2. Plantejament de la solució

Exposada la problemàtica, passem ara a plantejar una solució que ja s'aplica en una petita proporció dels sistemes de recàrrega que podem trobar al mercat. En primer lloc cal remarcar que tot i que fins aquest punt hem estat parlant en tot moment de potència contractada, a partir d'aquí parlarem únicament d'intensitat, passant a considerar que la tensió es manté estable i constant a 230 V, que per la llei de Joule serà la relació de proporcionalitat entre intensitat i potència.

Aprofitant que la intensitat de recàrrega d'un VE és una variable fàcilment controlable, a diferència del consum fix d'altres aparells com neveres i congeladors, es considera la possibilitat de realitzar un control dinàmic de la intensitat de recàrrega en funció del consum de la resta de l'habitatge. D'aquesta manera, limitarem la demanda màxima de potència en un punt, en aquest cas al comptador de l'habitatge que actua com a interruptor de control de potència, a un valor fix que mai se sobrepassarà.

Donat que es considera que el sistema de recàrrega s'alimentarà per una línia dedicada des del comptador, amb les seves proteccions corresponent, se suposa constant la intensitat màxima que superarà aquesta línia. Si es dóna el cas que la intensitat per la qual està dimensionada aquesta línia d'alimentació és inferior a la intensitat màxima que pot acceptar l'OBC del VE, caldrà aplicar una limitació addicional, en aquest cas constant, al sistema de recàrrega del VE, per no superar en cap cas la intensitat màxima de la línia, cosa que en el millor dels casos faria saltar les proteccions. És per això que la majoria d'EVSE disposen d'un selector per tal de limitar la intensitat màxima que podran entregar en funció de la capacitat de la línia des de la qual s'alimentin.

La configuració consistirà en col·locar a sensor de corrent en la línia d'alimentació general de l'habitatge, des de la que s'alimenta tant el sistema de recàrrega del VE com tota la resta d'aparells elèctrics.

Amb aquest objectiu, s'estableix un algoritme de control segons el següent diagrama de flux:

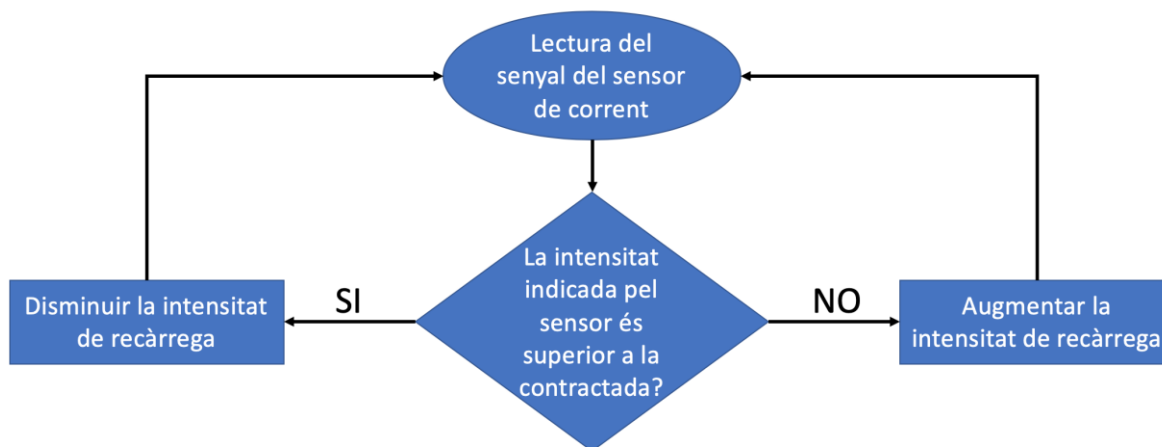


Figura 5.5. Algoritme de control de la intensitat de recàrrega. Font: elaboració pròpia.

D'aquesta manera s'estableix una potència de recàrrega òptima en cada moment, que serà la resultant de la diferència entre la contractada i la consumida per la resta de l'habitatge. Aquesta potència, a la que podríem identificar com a potència disponible, serà la que caldrà utilitzar com a potència de consigna a enviar al sistema de control de la recàrrega del VE.

5.2.3. Altres casos d'aplicació de la solució

Aquest mateix sistema també es pot utilitzar en cas que es vulgui limitar la potència per qualsevol altra raó, més enllà d'evitar superar la potència contractada.

Un exemple podria ser el cas d'instal·lacions de recàrrega multipunt per a recarregar simultàniament més d'un VE. Aquest és molt típic en aparcaments públics que disposen d'una instal·lació amb diferents punts de recàrrega de VE pels seus clients. Donat que pot haver-hi una alta variabilitat en la demanda de potència de la instal·lació, ja que dependrà de molts factors com ara la potència màxima de recàrrega de cada VE, la quantitat de vehicles, l'estat de càrrega, entre d'altres, caldrà dimensionar la línia d'alimentació de la que s'abasteixen tots aquests sistemes de recàrrega.

Tot i que el més senzill seria dimensionar aquesta línia d'alimentació considerant la suma de les potències màximes que poden subministrar tots els sistemes de recàrrega, aquesta opció pot suposar un cost desmesurat i innecessari des d'un punt de vista econòmic, ja que difícilment es donarà el cas en què tots els sistemes de recàrrega estiguin entregant la seva màxima potència. És per això que en algunes ocasions, s'opta per implementar un control dinàmic de potència similar al descrit anteriorment, en el que la intensitat limitant ve fixada

per la capacitat de la línia d'alimentació, amb la dificultat afegida que ja no es tracta de controlar la intensitat màxima de recàrrega d'un sol EVSE sinó de varis. Aquesta capacitat màxima de la línia d'alimentació pot venir també fixada prèviament per la potència màxima disponible que es considera que es disposarà en una altra línia d'alimentació superior, com la de tot l'aparcament, o directament de la potència contractada.

A partir d'aquí podem trobar plantejaments encara més complexos. Per exemple, si considerem una instal·lació trifàsica en la que hi carreguen VE que disposen d'un OBC monofàsic, és a dir, tan sols poden acceptar corrent d'una de les fases disponibles. Si es tractés per exemple d'una instal·lació amb tres punts de recàrrega, una possible solució podria ser destinar cadascuna de les fases a cada punt, per tal de tractar reduir el desequilibri o saturació que podria causa que tots ells estiguessin endollats en una mateixa fase. Si disposem d'un nombre més elevat de punts de recàrrega, en canvi, pot succeir que, tot i distribuir uniformement les fases entre els punts per tal que hi hagi el mateix nombre de punts de recàrrega per cada fase, es produeixi un desequilibri si es dona el cas que justament els punts d'alguna de les fases tenen una demanda superior a la resta. Mitjançant l'ús de contactors que puguin modificar l'ordre de les fases a petició del sistema de recàrrega, es podrà optimitzar la potència de recàrrega reequilibrant el sistema elèctric.

A tall d'exemple; es planteja un cas en el que es disposa de trenta punts de recàrrega en una instal·lació trifàsica. Si es connecten els punts de recàrrega en grups de deu a cada una de les fases, hi haurà deu punts connectats a la fase R, deu més a la fase S i deu més a la fase T. Si per diverses circumstàncies es dona el cas que, de forma aleatòria, arriben deu vehicles i es connecten tots a la fase R, aquesta podria estar saturada i crear un desequilibri a la xarxa, mentre que hi hauria total disponibilitat de les fases S i T. Si s'aplica un control que permeti modificar les fases, mitjançant per exemple l'ús de contactors, es podrà redistribuir l'ordre de tal manera que, en el cas plantejat, hi hagi tres vehicles carregant a la fase R, tres a la S i tres a la T.

5.3. Control horari simple de la recàrrega

5.3.1. Situació actual

Tal com s'ha introduït en l'escenari plantejat, per a la realització d'aquest projecte tenim en consideració que el potencial usuari disposa d'una tarifa amb discriminació horària, més concretament la tarifa 2.0 DHS del mercat regulat. Aquesta tarifa ofereix doncs un tram en el que el cost del terme d'energia és mínim i, per aprofitar-lo, és necessari realitzar la recàrrega del VE dins d'aquest període de temps.

5.3.2. Plantejament de la solució

La solució consisteix amb disposar d'un control horari de l'inici de la recàrrega per poder-la programar fent-la coincidir amb el període en què el cost del terme d'energia és més reduït. Aquest control hauria de permetre indicar l'inici del període per tal que el VE iniciés la recàrrega automàticament sense necessitat de cap acció per part de l'usuari. Una altra possibilitat seria indicar l'hora de finalització de la recàrrega, tot i que en aquest cas caldria plantejar un mètode de càlcul de l'hora d'inici, doncs aquesta dependrà d'alguns paràmetres com l'estat de càrrega del vehicle, la capacitat de recàrrega, etc.

Alguns VE i EVSE ja disposen d'aquesta funcionalitat de programació de l'inici de la recàrrega del VE, tot i que és important coneixen el seu funcionament per aprofitar-ne el màxim les seves possibilitats d'optimització.

5.4. Control dinàmic de la recàrrega en combinació amb una instal·lació fotovoltaica

5.4.1. Situació actual

El descens del cost dels panells solars fotovoltaics, juntament amb un increment del cost de la factura elèctrica i una major consciència ecològica, han propiciat en els últims anys un auge de noves instal·lacions FV (fotovoltaïques) en l'àmbit domèstic. El Reial decret 244/2019, de 5 d'abril [10], que incentiva aquesta i regula aquest tipus d'instal·lacions, fa pensar que això ha estat només el principi i que en els pròxims anys hi haurà un creixement exponencial del nombre d'habitatges que es beneficiïn d'instal·lacions de panells solars fotovoltaics.

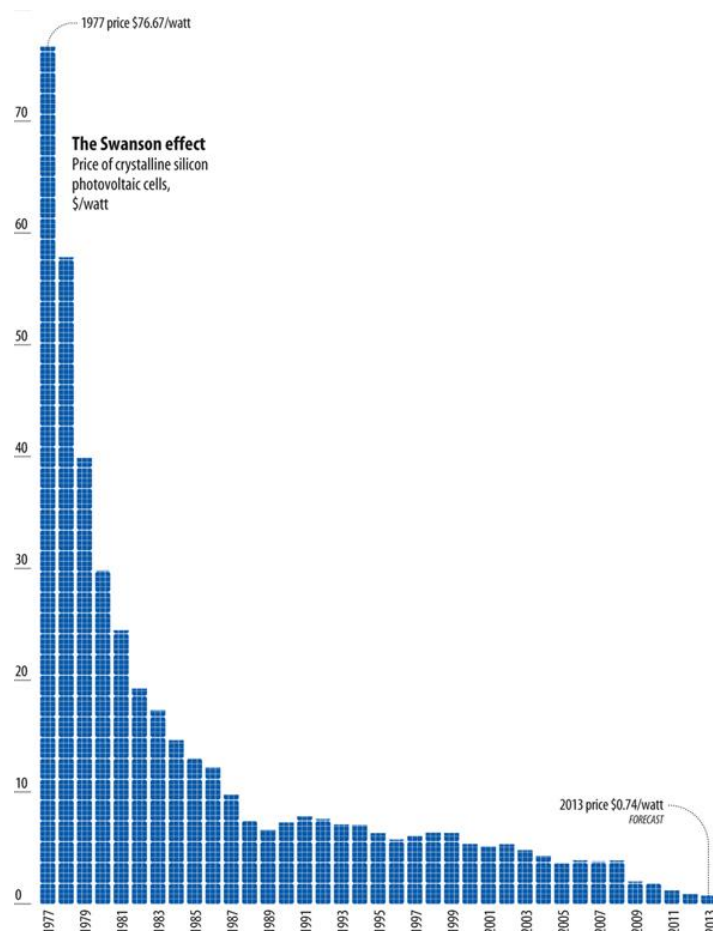


Figura 5.6. Evolució del cost [\$/W] dels panells FV. Font: BloombergNEF

Per tot un seguit de raons com ara la capacitat econòmica, el fet de viure majoritàriament en habitatges unifamiliars, una major demanda d'energia elèctrica o una major consciència ecològica, els propietaris d'un VE són clarament uns dels principals usuaris potencials

d'aquest tipus d'instal·lacions, i és per això que cal pensar en aquest possible escenari a l'hora d'optimitzar el procés de recàrrega del VE.

Pel que fa a instal·lacions d'energia FV, podem classificar-les en dues tipologies principals, les que estan connectades a la xarxa i les que no ho estan. Així com les que no estan connectades a la xarxa han de disposar d'algun sistema d'emmagatzematge d'energia per tal de disposar-ne en els períodes en els que no hi hagi llum solar, les que estan connectades a la xarxa poden no disposar de cap mètode d'emmagatzematge de l'energia generada. La normativa estatal actual en matèria d'autoconsum permet el que es coneix com la compensació d'excedents, ideada especialment per aquest tipus d'instal·lacions connectades a la xarxa que no disposen de cap element d'emmagatzematge de l'energia. Aquestes instal·lacions, conegudes com a instal·lacions d'autoconsum, tenien fins fa pocs anys l'inconvenient que es veien obligades a desaprofitar l'energia excedent que no es podia consumir al mateix instant en que es produïa, de tal manera que era altament probable que, segons estigués dimensionada la instal·lació, es malbaratés una porció important de l'energia produïda en les hores centrals del dia.

Aquest problema ha generat una demanda per part dels defensors de l'energia FV; poder injectar l'energia excedentària a la xarxa obtenint-ne una contraprestació. Tot i els evidents efectes positius d'aquesta proposta, no va ser fins a l'arribada del decret anteriorment citat que es va regular aquesta modalitat d'autoconsum. Gràcies a això, actualment és possible realitzar el que es coneix com a compensació simplificada d'excedents, que consisteix en poder compensar part del cost de la factura d'electricitat corresponent a l'energia consumida de la xarxa a partir de l'energia injectada.

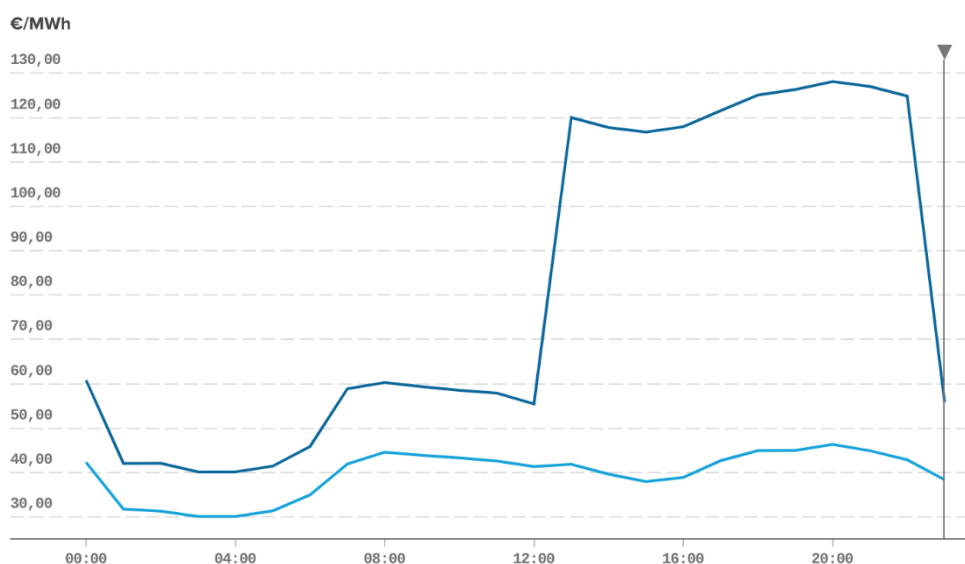


Figura 5.7. Evolució del preu del terme d'energia [€/MWh] en la tarifa regulada per al dia 29/01/2020. En blau cel el cost de compensació d'excedent, en blau marí el cost d'adquisició de l'energia amb la tarifa 2.0 DHS. Font: REE [8].

Tot i això, el cost de compensació atorgat a l'energia injectada és sempre menor al cost més baix de l'energia per una a mateixa jornada, fins i tot si ens fixem en la tarifa 2.0 DHS del mercat regulat que és la que ofereix menors costos.

5.4.2. Plantejament de la solució

És indiscutible que la compensació d'excedents suposa un abans i un després en matèria de consum i amortització d'instal·lacions FV que pot portar a moltes famílies a fer el pas cap a la inversió en aquest tipus d'instal·lacions.

El fet però que existeixi una diferència entre el cost de compensació i el de compra de l'energia fa que, si existeix una previsió i un control d'una futura demanda, com podria ser el cas de la recàrrega d'un VE, pugui ser econòmicament favorable realitzar la recàrrega del VE aprofitant aquest excedent en comptes d'injectar-lo a la xarxa per obtenir-ne una compensació si se'n té l'oportunitat.

Així i doncs, atès que com s'ha indicat anteriorment el cost de l'energia consumida de la xarxa és sempre superior al de compensació pels excedents d'energia injectats, es planteja la possibilitat d'idear un algoritme que, en cas d'existir un excedent d'energia i una previsió de necessitat de recàrrega per part del VE, activi la recàrrega per tal d'aprofitar aquest excedent. D'aquesta manera, el VE es carregaria amb l'energia generada per la instal·lació FV, obtenint un balanç final de cost inferior al que suposaria injectar aquesta energia a la xarxa per després realitzar la recàrrega del VE en les hores més econòmiques.

En qualsevol cas, per a la realització de l'algoritme, caldrà tenir en compte que els protocols de recàrrega d'un VE contemplen una intensitat mínima de 6 A, el que equival a 1380 W a una tensió de 230 V, pel que, en un principi, podria semblar que aquesta és la potència excedentària mínima a disposar per iniciar la recàrrega del VE. Això, però, no seria del tot cert si es vol idear un algoritme el més optimitzat possible, doncs per calcular la potència de recàrrega a partir de la qual es considera òptim iniciar la mateixa, caldria considerar també, més enllà del cost futur de l'energia en el moment de previsió de la recàrrega, el cost de l'energia en el moment de generació excedentària.

En resum, la recàrrega del VE s'hauria d'iniciar en el moment que aquesta condició esdevingués certa:

$$\Delta \cdot (P_{Mínima} - P_{FV}) \cdot C_{Actual} < P_{Mínima} \cdot C_{Mínim} - P_{FV} \cdot Pr_{C.Excedent} \quad (2)$$

On:

- Δ és un coeficient per crear una histèresi, essent $\Delta > 1$
- $P_{Mínima}$ és la potència mínima de recàrrega, és a dir 1380 W
- P_{FV} és la potència FV generada, en kW
- C_{Actual} és el cost actual de l'energia, en €/kWh
- $C_{Mínim}$ és el mínim cost previst de l'energia per les properes 24h, en €/kWh
- $Pr_{C.Excedent}$ és el preu de compensació dels excedents generats, en €/kWh

Per contra, la recàrrega del VE s'hauria d'aturar únicament en cas que la següent condició passés a ser certa:

$$(P_{Mínima} - P_{FV}) \cdot C_{Actual} > P_{Mínima} \cdot C_{Mínim} - P_{FV} \cdot Pr_{C.Excedent} \cdot \Delta \quad (3)$$

Establint d'aquesta manera una histèresi gràcies al coeficient Δ , amb l'objectiu d'evitar que el sistema estigui contínuament activant i desactivant la recàrrega en cas que la P_{FV} oscil·li al voltant del valor llindar de l'equació. Igualment, també seria necessari ajustar dinàmicament la intensitat de recàrrega d'acord amb la potència FV generada.

En cas de ser la potència de generació FV superior a la potència mínima de recàrrega, sempre serà més òptim iniciar la recàrrega, donat que es pot assegurar que el cost de l'energia excedentària és inferior al cost mínim de l'energia a adquirir de la xarxa.

Per últim, la idea d'optimitzar la recàrrega del VE en instal·lacions d'autoconsum no tindria per què limitar-se a les que no disposen de capacitat d'emmagatzematge, doncs en les que disposen d'aquesta capacitat també existiria en tot moment un marge d'oportunitat d'optimitzar els costos de l'energia consumida, tot i que l'algoritme podria ser ostensiblement més complicat.

5.5. Control dinàmic de la recàrrega en funció del cost de l'energia

5.5.1. Situació actual

Tal com s'ha explicat anteriorment, el tipus de tarifació que s'utilitza com a referència per la realització d'aquest projecte té la particularitat que el cost de l'energia varia contínuament en períodes d'una hora. Des d'un punt de vist econòmic, aquest mètode de valoració del preu de l'energia sembla clarament el més eficient, doncs permet mantenir una relació real i directa del cost amb l'oferta i la demanda. Dit en altres paraules, el preu de l'energia que pagarà el consumidor final anirà estretament lligat amb el preu que pagarà l'empresa comercialitzadora, que alhora dependrà directament del preu que s'hagi establert en el mercat majorista.

A partir d'un sistema de subhasta diari que té en compte la previsió de demanda, s'acaba assignant un preu per unitat d'energia a cadascuna de les hores del dia posterior al de la realització de la subhasta. Aquest preu es publica diàriament al portal de REE a les 20.15 h de tal manera que el consumidor pot conèixer quin serà el preu al que se li facturarà l'energia consumida l'endemà.

5.5.2. Plantejament de la solució

Tal com s'ha exposat en apartats anteriors, i a diferència de la majoria d'electrodomèstics i aparells que tenen un consum elèctric en un habitatge, el VE té la particularitat de poder modular fins a un cert punt i dins d'uns marges el seu consum. Aquest avantatge permet, en primer lloc, que la recàrrega no s'hagi de realitzar tan bon punt el VE s'endolla al sistema de recàrrega, sinó que es pugui programar, tal com s'ha plantejat en l'apartat 0. En segon lloc, permet modular la potència de la recàrrega segons un paràmetre desitjat, de la mateixa manera que es planteja en l'apartat 5.2. Si unim aquests dos conceptes i hi afegim la possibilitat de crear dos perfils, un d'ús del VE i un de demanda de l'habitatge, podem arribar a un sistema encara més eficient que les dues solucions anteriorment plantejades.

Aquesta solució consistirà, a grans trets, en recarregar el VE en les hores en què el cost del terme d'energia sigui més baix, obtenint el mínim cost possible en el procés de recàrrega però tenint en compte en tot moment les limitacions del sistema per garantir que l'usuari disposarà del nivell de recàrrega desitjat.

Amb aquest objectiu, es requerirà bàsicament de la següent informació:

- Perfil de consum de l'habitatge
- Perfil de consum del VE
- Preu de l'energia per al dia actual i per al dia següent

5.5.2.1. Perfil de consum de l'habitatge

Correspon a una previsió del consum horari de l'habitatge per a les pròximes hores. Guardant les distàncies, es podria dir que seria quelcom similar al que es duu a terme per poder realitzar les subhastes en les que es determina el cost de l'energia, amb un mètode molt més senzill i amb la particularitat que estaria centrat en un habitatge en concret.

Encara que el perfil real futur de consum sigui una dada totalment desconeguda, ja que sempre dependrà d'alguns factors imprevisibles, especialment per part de les interaccions amb els aparells elèctrics de l'habitatge que puguin tenir els seus residents, sí que és possible fer una previsió del consum a partir d'un patró obtingut basat en el consum històric de l'habitatge. Així doncs, és evident, per exemple, que durant altes hores de la nit i matinada, moment en que els residents dormen i no tenen interacció amb els diferents aparells elèctrics de l'habitatge, el consum de l'habitatge es manté pràcticament invariable, o si més no, els aparells que s'engeguen ho fan per tenir programat el seu funcionament (per exemple, un acumulador d'aigua calenta que s'engega en aquest període per aprofitar el menor cost de l'energia), pel que el seu consum pot ser fàcilment previsible. El mateix es podria aplicar a les hores del dia en les que els seus residents són fora de casa.

La més alta variabilitat del model es pot donar en les hores en les que els residents són a l'habitatge i realitzen algun tipus d'interacció amb els aparells elèctrics que pugui provocar una variació en el consum total de l'habitatge, és a dir en les franges horàries del matí (des que els residents es desperten fins que marxen a treballar) o la tarda (des que arriben de treballar fins que van a dormir). El mateix cas succeeix els caps de setmana o dies en els que els usuaris o altres variables externes fan que no se segueixi la rutina habitual de cada dia, pel que això és quelcom que també caldrà tenir en consideració per a aquest model. Encara que aquesta variabilitat faci més difícil obtenir un model més acurat d'aquest perfil de consum que volem obtenir, no el fa inviable, doncs aquesta incertesa serà una dada més a incorporar al model a tenir en compte a l'hora de fer-ne ús que servirà per ajustar un marge de seguretat que s'explicarà més endavant.

Tenint en compte que existeixen moltes maneres d'obtenir aquest model de predicció de consum, en aquest apartat només es plantejarà una proposta bàsica, doncs aprofundir en aquest tema s'escapa de l'objectiu d'aquest projecte. Tot i això, si que es presentaran possibles millores d'es d'un punt de vista teòric que podrien ser perfectament aplicables disposant dels coneixements necessaris.

Aquesta proposta consisteix a obtenir un perfil horari de període setmanal del consum de l'habitatge, és a dir tractar cada dia de la setmana com una unitat independent a analitzar. El sentit d'aquest mètode és que es considera que el patró de demanda d'energia elèctrica de l'habitatge es repeteix de manera setmanal. És a dir s'entén que el consum de cada

dilluns és similar al dels dilluns anteriors i passats i així successivament. El mateix succeeix amb la resta de dies de la setmana. En canvi, es considera que el consum de l'habitatge d'un dia de cap de setmana no té per què seguir el mateix patró que el d'un dia entre setmana, ja que molt probablement les persones residents de l'habitatge modifiquin substancialment els seus hàbits d'utilització dels aparells elèctrics i de consum durant els dies no laborables. De la mateixa manera, els horaris de la nostra societat estan majoritàriament concebuts per repetir-se amb un període setmanal. Per exemple, és probable que acostumem a posar la rentadora o el rentaplats un dia i una franja horària concreta de la setmana, que solguem assistir a classes d'angles un dia de la setmana a una hora concreta o que acostumem a estar fora de casa per anar a comprar un dia concret de la setmana a una hora concreta.

Tal com s'ha explicat en el plantejament de la solució d'aquest apartat, tractarem d'utilitzar els mètodes introduïts anteriorment per obtenir les dades necessàries per arribar a definir aquest perfil de consum necessari per aplicar la solució presentada. En aquest cas, es requerirà disposar de les dades del consum de tot l'habitatge sense tenir en compte el consum corresponent al VE. És per això que, a banda d'un sensor en el comptador de l'habitatge, caldrà afegir també un segon comptador addicional destinat a monitorar el consum del VE, per tal de descomptar aquest del total de l'habitatge.

Seguidament, ens fixarem únicament en el consum horari de l'habitatge, és a dir, emmagatzarem les dades del consum d'energia elèctrica per a cada hora completa de cada dia. Encara que el sensor de corrent ho pugui aportar, no necessitem més resolució que aquesta, ja que al ser el cost de l'energia una variable que canvia amb un període d'una hora, l'únic que acabarem necessitant és el perfil de consum registrat per a cada hora. Serà a partir d'aquest consum horari de cada dia de la setmana a partir del qual, aplicant un senzill algoritme, obtindrem una predicció de consum del mateix dia de la propera setmana.

Aquest algoritme consistirà en una simple mitjana ponderada dels consums corresponents al mateix dia i hora de les quatre setmanes anteriors. Una manera de ponderar-los podria ser, per exemple, assignant un pes del 5 % al consum corresponent al mateix dia i hora però de quatre setmanes enrere, del 15 % al consum corresponent al mateix dia i hora però de tres setmanes enrere, del 30 % al consum corresponent al mateix dia i hora però de dues setmanes enrere i d'un 50 % al consum corresponent al mateix dia i hora de la setmana anterior, tal i com es presenta en la fórmula següent:

$$C_{S,D,H} = 0,05 \cdot C_{S-4,D,H} + 0,15 \cdot C_{S-3,D,H} + 0,30 \cdot C_{S-2,D,H} + 0,50 \cdot C_{S-1,D,H} \quad (4)$$

On:

- $C_{S,D,H}$ és l'estimació del consum del dia de la setmana D, de la setmana S a l'hora H, on:
 - D és el dia de la setmana (dilluns, dimarts, dimecres, dijous, divendres, dissabte o diumenge)
 - S és el número de setmana (4, 5, 6, 7...)
 - H és l'hora del dia (0,1,2,3...,21,22,23)

Cal destacar novament que aquest no és, ni de bon tros, el mètode que es pugui considerar més acurat per obtenir aquest perfil predictiu de consum, doncs de ben segur que es podrien implementar algoritmes que obtinguessin resultats que s'aproximessin molt més a la realitat i millors patrons de consum. A tall d'exemple, existeixen actualment processos complexes basats en algoritmes d'intel·ligència artificial coneguts com a *virtual submetering* que, a partir d'una anàlisi acurada dels del consum d'un habitatge, són capaços de discernir quin consum diari tenen alguns dels aparells de l'habitatge, com podrien ser la rentadora, el frigorífic o el rentaplats, basant-se en els patrons de consum que generen aquests electrodomèstics.

De totes maneres, es considera que l'obtenció d'un algoritme més precís va més enllà de l'objectiu d'aquest projecte, pel que en aquest cas s'ha limitat a plantejar un mètode simple i mínimament efectiu que es podria considerar com una bona aproximació conceptual.

5.5.2.2. Perfil de consum del VE

El perfil de consum del VE no serà més que l'energia que requereix el vehicle per a completar la seva recàrrega diària. En aquest apartat es pressuposarà que el VE realitza una recàrrega important al dia, que té lloc entre el vespre i el matí del l'endemà, on recupera tota l'energia consumida durant aquella mateixa jornada.

Per realitzar el còmput d'aquesta energia, caldrà establir una hora límit a partir de la qual es considerarà que la recàrrega correspon a l'energia a utilitzar pel VE per a la jornada següent, per exemple, les 15 h de la tarda. Seguint l'exemple, en un mateix dia, es considerarà que l'energia recarregada entre les 3 i les 4 h de la matinada correspon al consum del VE per aquell mateix dia, mentre que l'energia recarregada entre les 21 i les 22 h del vespre es considerarà com el consum del VE a computar per l'endemà. D'aquesta manera, s'obtindrà un historial de consum diari del VE, entenent aquest com la quantitat d'energia necessària per recarregar totalment el VE per cada un dels dies de la setmana. Així doncs, l'energia recarregada pel VE entre les 15 h d'un diumenge i les 15 h d'un dilluns, es comptabilitzarà com l'energia necessària per a l'ús del VE durant tota la jornada del dilluns, i així amb cadascun dels dies de la setmana.

A partir d'aquest historial i seguint el mateix mètode que en l'apartat anterior, es realitzarà una predicció de consum del VE basada en les dades recopilades durant les últimes quatre setmanes, amb la diferència que, en aquest cas, no serà necessari diferenciar l'hora en la que es realitza el consum, sinó que serà suficient amb estimar l'energia consumida entre les 15h d'un dia i les 15h del següent.

Així doncs, aplicant un càlcul similar al de l'apartat 5.5.2.1, es podria considerar que el consum previst es pot extreure de la fórmula:

$$CVE_{S,D,H} = 0,05 \cdot CVE_{S-4,D,H} + 0,15 \cdot CVE_{S-3,D,H} + 0,30 \cdot CVE_{S-2,D,H} + 0,50 \cdot CVE_{S-1,D,H} \quad (5)$$

- $CVE_{S,D,H}$ és l'estimació del consum del VE pel dia de la setmana D, de la setmana S a l'hora H, on:
 - D és el dia de la setmana (dilluns, dimarts, dimecres, dijous, divendres, dissabte o diumenge)
 - S és el número de setmana (4, 5, 6, 7...)
 - H és l'hora del dia (0,1,2,3...,21,22,23)

De la mateixa manera que en el cas de l'apartat 5.5.2.1, aquest només és un model d'exemple millorable aplicant una metodologia més avançada, però al mateix temps s'estima que aquest càlcul va més enllà d'aquest projecte, pel que es considera suficient per l'objectiu plantejat.

Tot i això, en aquest cas, cal destacar que, així com l'estimació de la demanda de l'habitatge pot tenir una certa variabilitat difícilment predictable, en el cas de l'estimació de la demanda per la recàrrega completa del VE si que existeixen dades suficients que ens podrien ajudar a estimar quina serà l'energia requerida pel VE per finalitzar la seva recàrrega. El problema, però, és l'accés a aquestes dades.

Ens referim a l'estat de càrrega inicial de la bateria, l'estat de càrrega final⁶ que es vol assolir i la capacitat total d'aquesta. Realitzant un simple càlcul es pot obtenir, de manera precisa, quina serà l'energia necessària per completar la recàrrega del VE:

$$CVH = \frac{(SoC_F - SoC_I) \cdot CB}{FR} \quad (6)$$

On:

- CVH és l'estimació del consum del VE, en kWh
- SoC_F és l'estat de càrrega final o desitjat de la bateria, en tant per ú
- SoC_I és l'estat de càrrega inicial de la bateria, en tant per ú
- CB és la capacitat de la bateria, en kWh
- FR és un factor corrector relacionat amb el rendiment del procés de recàrrega, doncs cal considerar les pèrdues entre l'EVSE i la bateria del VE i es podria considerar de l'ordre de 0,85

Com s'ha comentat en l'apartat 4.2, aquestes són unes dades de les que avui dia només es pot disposar utilitzant protocols de comunicació complexos entre el VE i el sistema de recàrrega, que són els que s'utilitzen en el cas de la recàrrega en corrent continu. En aquest cas, però, en que estem parlant de recàrrega domèstica en corrent altern, no és possible obtenir aquesta informació amb els protocols de comunicació actuals. Tot i això, gràcies a les capacitats de la nova ISO 15118, si que serà possible obtenir en un futur disposar d'aquesta informació també en el cas de sistemes de recàrrega en corrent altern, cosa que permetria optimitzar encara més el procés de recàrrega i aplicar amb major facilitat aquest plantejament.

⁶ L'estat de càrrega en finalitzar la recàrrega no té per què correspondre amb el 100%, ja que alguns VE permeten disminuir aquest valor amb l'objectiu primordial de preservar i allargar la vida de la bateria. En apartats posteriors es donen més detalls referents a aquesta particularitat.

5.5.2.3. Preu de l'energia pel dia actual i per l'endemà

El preu variable de l'energia és la raó principal que dóna sentit a aquesta solució, i per obtenir-lo tan sols caldrà dirigir-se al portal de REE [8] a on es publiquen diàriament els preus horaris de l'energia per l'endemà, a partir de les 20:15h.

5.5.2.4. Algoritme

L'algoritme a aplicar pretén aprofitar, per una banda, el coneixement del cost futur del terme d'energia per cada una de les hores i per l'altra, la capacitat de disposar d'un control sobre el procés de recàrrega del VE. Partint d'aquests dos elements, l'objectiu serà realitzar la recàrrega del VE disminuint el cost de la recàrrega al mínim.

A tall de resum i per tal de que es pugués entendre d'es d'una òptica econòmica, podríem dir que ens trobem en un escenari en el que disposem de les necessitats de consum d'un recurs, el seu cost actual i futur i que, al mateix temps, disposem de la capacitat d'emmagatzemar-lo sense cap mena de cost afegit.

A grans trets, el que pretén aquesta solució és **repartir les necessitats de recàrrega previstes del VE entre les hores en les que estigui endollat, donant preferència a les hores on el cost de l'energia és més baix, tenint en compte la capacitat estimada de recàrrega en cada hora i garantint la finalització de la recàrrega a una hora determinada.**

En els subapartats següents es detalla pas per pas l'algoritme que es planteja en aquesta secció.

5.5.2.4.1 Repartir les necessitats de recàrrega previstes del VE

Gràcies al perfil de consum del VE podem conèixer les seves necessitats diàries de recàrrega, és a dir, l'energia que requereix diàriament el VE per completar la recàrrega de la seva bateria i recuperar l'autonomia desitjada. Caldrà doncs repartir aquesta quantitat d'energia prevista entre les hores que el VE romangui endollat per tal de poder completar la recàrrega del VE dins del temps del que es disposa.

5.5.2.4.2 Donar preferència a les hores en les que el cost de l'energia és menor

El mètode amb la que es durà a terme aquest repartiment consistirà en donar preferència a les hores en les que el cost de l'energia és més baix, reduint així el cost total de la recàrrega. Amb aquest objectiu, es procedirà a ordenar les hores en les que es considerarà que es pot dur a terme la recàrrega del VE segons el cost de l'energia en cada una d'elles, sent l'hora de menor cost del terme d'energia la primera i la de major cost l'última.

5.5.2.4.3 Tenir en compte la capacitat estimada de recàrrega en cada hora

A cada hora se li assignarà una capacitat màxima de recàrrega, amb dos únics limitants. En primer lloc la capacitat de recàrrega de la instal·lació, considerant també la capacitat de recàrrega de l'OBC del VE. En segon lloc, la capacitat de subministrament d'energia elèctrica de la nostra instal·lació per al VE tenint en compte, per una banda, la potència contractada i, per l'altra, l'estimació de consum de l'habitatge. A causa del fet de que el segon limitant serà clarament més restrictiu que el primer en la pràctica totalitat de situacions, ens centrarem només en aquest segon paràmetre.

Així doncs, podrem afirmar que la capacitat estimada d'energia que es podria subministrar en una franja horària per part de la instal·lació destinada al VE serà igual a la diferència entre la capacitat màxima de subministrament de la instal·lació de l'habitatge tenint com a restricció la potència contractada i l'estimació de consum de l'habitatge. Si ho plasmem en una equació, obtenim:

$$C_{VE} = P_C \cdot 1h - C_H \quad (7)$$

On, per a cada període d'una hora:

- C_{VE} és la capacitat estimada d'energia que seria capaç de subministrar la instal·lació al VE, en kWh
- P_C és la potència contractada de l'habitatge en kW
- C_H és l'estimació de consum

A tall d'exemple i aplicant l'equació exposada, si es disposa d'una potència contractada (P_C) de 4 kW i d'un consum estimat per a una hora concreta (C_H) de 0,7 kWh:

$$C_{VE} = P_C \cdot 1h - C_H = 4 \text{ kW} \cdot 1h - 0,7 \text{ kWh} = 3,3 \text{ kWh}$$

De tal manera que consideraria que la capacitat de subministrament d'energia elèctrica de la instal·lació per al VE en aquella hora concreta seria de 3,3 kWh.

Aquest càlcul es realitzarà per a cada una de les hores i es tindrà en compte per a realitzar un correcte repartiment de les necessitats de recàrrega previstes del VE, tractant així de no superar la potència contractada en cap moment.

5.5.2.4.4 Garantir la finalització de la recàrrega a una hora determinada

És una condició primordial garantir que l'usuari disposi de la recàrrega desitjada un cop decideixi fer ús del VE, pel que caldrà aplicar uns marges de seguretat en algun o alguns paràmetres calculats anteriorment. Per exemple, es pot considerar que l'energia estimada

per a recarregar el VE és de l'ordre d'1,2 vegades la calculada per l'algoritme, o bé que la previsió de consum de l'habitatge és 1,2 vegades superior a l'estimada inicialment.

D'aquesta manera és possible que s'obtinguin resultats lleugerament inferiors pel que fa a l'objectiu de la reducció del cost econòmic de la recàrrega, és a dir, s'augmentarà el cost final de la mateixa, però en aquest cas pot ser preferible donar preferència a una necessitat superior com és que el VE hagi completat la recàrrega un cop s'hagi d'utilitzar.

Una possible millora pel que fa als marges de seguretat, seria que guardessin certa relació amb la variabilitat de les previsions. Això es podria fer, per exemple, tenint en consideració un paràmetre de variabilitat a l'hora de determinar les previsions, tant pel que fa al consum de l'habitatge com al del VE. Per exemple, el paràmetre de seguretat per fer aquestes estimacions de consum en els dies laborables, en els que s'acostumen a seguir rutines, podria ser inferior al mateix paràmetre per al cap de setmana, en el que la falta d'aquestes rutines propicia una major variabilitat en els hàbits de consum d'energia en l'àmbit de l'habitatge o d'ús pel que fa a desplaçaments amb el VE.

Atès que aquest és un paràmetre que afecta directament al cost de la recàrrega i que es podria considerar un paràmetre subjectiu, ja que el nivell de risc desitjat pot ser un criteri de l'usuari, podria ser un paràmetre configurable. Per exemple, un usuari que disposi d'un VE amb una bateria amb una capacitat tal que no consumeixi més d'un 30 % del total per al seu trajecte diari pot preferir mantenir un marge de seguretat menor, doncs no li suposarà cap problema que en algunes ocasions no disposi del l'estat de càrrega desitjat en utilitzar el vehicle. En canvi, un usuari que necessita imperiosament assegurar que tindrà l'estat de càrrega desitjat a l'hora d'utilitzar el seu VE pot preferir assumir un possible augment del cost de la recàrrega a canvi de reduir el risc de trobar-se el VE amb un estat de càrrega menor a l'esperat.

Una altre mètode addicional al que seria interessant recórrer per tal d'assegurar aquest objectiu, seria que el sistema incorporés un càlcul continu de les necessitats de recàrrega per anar balancejant i ajustant el control de la potència. En altres paraules, que fos capaç d'adaptar-se reajustant la potència dinàmicament segons hagi pogut complir o no amb l'objectiu de recàrrega proposat en cada una de les hores.

Per exemple, si durant la primera hora de recàrrega el sistema detectés que no ha sigut capaç d'entregar tota l'energia que tenia encomanada segons l'algoritme inicial, caldria recuperar d'alguna manera l'entrega d'aquesta energia, refent l'algoritme i augmentant les necessitats de recàrrega del VE per les hores posteriors, recalculant les hores necessàries per a finalitzar la recàrrega.

5.5.2.5. Exemple pràctic d'aplicació

Per últim, i amb l'objectiu de mostrar d'una manera gràfica i senzilla tot el plantejat anteriorment, es realitza un exemple d'aplicació de l'algoritme mitjançant una taula horària. Per això, es planteja un escenari en el que l'usuari del VE endolla el vehicle al sistema de recàrrega i aquest posa en marxa l'algoritme per determinar quin perfil de recàrrega haurà de seguir, a partir de totes les dades disponibles.

Per aquest exemple, s'ha estimat que l'energia total necessària per completar la recàrrega del VE en aquesta sessió un cop aplicat el factor corrector és de 12 kWh i que l'energia màxima disponible per hora, tenint en compte una potència contractada de 5 kW, és de 5 kWh. S'ha considerat també que el VE disposa d'un total de 10h per a finalitzar la recàrrega.

A partir d'aquí, l'algoritme realitzarà els càlculs corresponent segons la taula que segueix, en la que s'ordenen de menor a major els costos del terme d'energia i s'hi expressen les quantitats horàries d'energia estimades per a l'habitatge i disponibles pel VE i s'hi calcula l'energia encomana a recarregar pel VE:

Taula 5-2. Exemple d'aplicació de l'algoritme proposat. Font: Elaboració pròpia.

Hora	Cost terme horari d'energia [€/kWh]	Ordre	Energia habitatge [kWh]	Energia disponible [kWh]	Energia a recarregar [kWh]
1	0,11	6	4	1	0
2	0,08	4	1	3	3
3	0,06	3	3	2	2
4	0,05	2	1	4	4
5	0,03	1	3	2	2
6	0,03	1	4	1	1
7	0,08	4	5	0	0
8	0,10	5	2	3	0
9	0,11	6	3	2	0
10	0,11	6	4	1	0

D'aquesta manera, s'acaba obtenint com a resultat quines seran les hores en les que el sistema haurà d'activar la recàrrega del VE així com quina energia s'estima que recarregarà en cadascuna d'aquestes hores. Si es compleixen les expectatives pel que fa a les estimacions d'energia disponible, aquesta hauria de finalitzar la recàrrega anteriorment al que s'ha calculat en aquesta taula, doncs cal tenir en compte que s'ha aplicat un factor corrector a l'energia demandada pel VE per tal d'evitar que la recàrrega s'allargui més enllà del previst i suposi un perjudici per l'usuari.

5.6. Altres possibilitats pel control de la recàrrega

Un dels aspectes que més preocupa, tant a propietaris com a potencials propietaris d'un VE, és la vida útil de la seva bateria. Tot i que aquest element evolucionat molt en els últims anys i es preveu que continuï evolucionant, reduint el seu cost, volum i pes específics, és cert que totes elles presenten, en major o menor grau, una degradació que acostuma a augmentar segons alguns paràmetres, com ara els anys de la bateria, l'ús o les condicions climàtiques a les que està sotmesa.

Aquest grau de degradació d'una bateria es mesura amb un paràmetre anomenat SoH (*State of Health*) que no és més que el tant per cent de capacitat que conserva la bateria respecte la seva capacitat original. A un vehicle nou se li suposa que tindrà un SoH d'un 100 %, que anirà disminuint al llarg del temps.

Les bateries d'un VE es componen de tot un seguit de cel·les que unides en una configuració sèrie-paral·lel conformen el paquet de la bateria. Aquestes cel·les, que poden ser de diferents composicions químiques en funció del fabricant o de les necessitats d'ús, tenen una tensió que està directament relacionada amb el seu estat de càrrega. Les bateries més utilitzades en el món del VE, les d'ions de liti, també conegudes com a Li-Ion (*lithium-ion*) acostumen a tenir una tensió nominal⁷ de 3,6 V, una tensió mínima fins a la qual es pot descarregar la cel·la d'entre 2,8 i 3 V i una tensió màxima fins a la que es pot recarregar de 4,2 V. Aquests últims dos paràmetres, tensió mínima i màxima de cada cel·la, es monitoren mitjançant el BMS (*battery management system*) del paquet que conforma la bateria i varien lleugerament en funció de les especificacions del fabricant del VE. És per això que, quan es donen les especificacions d'una bateria d'un VE, és possible que s'hi indiquin dues capacitats de bateries, una major corresponent a la capacitat bruta o total de la bateria i una d'inferior que indica la seva capacitat útil. Mentre que la primera correspondria a la capacitat de la bateria si es descarregués des d'una tensió de 4,2 V fins a una de 2,8 V, la segona indica la capacitat de la bateria un cop limitats aquests valors pel fabricant, és a dir, introduint un marge superior i inferior per tal d'evitar que la tensió de la bateria arribi als extrems de 4,2 i 2,8 V. La relació entre aquestes dues capacitats es coneix com a DoD (*Depth of Discharge*), es mesura en tant per cent i és un dels paràmetres que més afecta la degradació de la bateria, fet pel qual els fabricants prenen aquestes precaucions d'establir uns marges.

⁷ Es coneix com a tensió nominal a la tensió en la que la cel·la es troba a un estat de càrrega del 50%.

Un DoD menor permetrà realitzar un major nombre de cicles⁸ pel mateix grau de degradació, pel que conservarà millor la bateria, però tindrà l'inconvenient que oferirà menys autonomia tot i disposar de capacitat suficient, és a dir no permetrà utilitzar una part de la bateria, establint un límit inferior de descàrrega i superior de recàrrega en el que el VE mostrarà el valor màxim i mínim de l'estat de càrrega a l'usuari tot i que realment els valor reals siguin uns altres. Aquest efecte es pot apreciar en la Figura 5.8, en la que es duen a terme tests de durabilitat per cel·les de les mateixes característiques variant la tensió màxima de recàrrega. Mentre el nombre de cicles acumulats és baix, la capacitat de les cel·les que es recarreguen fins a una tensió màxima més elevada és superior a la resta, el que permet obtenir-ne una major capacitat. L'evolució mostra com, després de cent cicles, la cel·la que es recarrega fins a una tensió de 4,35 V mostra una capacitat d'emmagatzematge menor a la de la que es recarrega fins a 4,2 V. El pendent que mostra la degradació s'intensifica amb el pas dels cicles, essent clarament i amb diferència la cel·la amb la menor tensió màxima de recàrrega, de 4,2 V, la que presenta millors resultats.

Per altra banda, també s'aprecia com el salt quant fa a millora de comportament entre cel·les a diferent tensió màxima de recàrrega no és directament proporcional a la diferència de tensió, sinó que va disminuint a mesura que disminueix la tensió màxima de recàrrega.

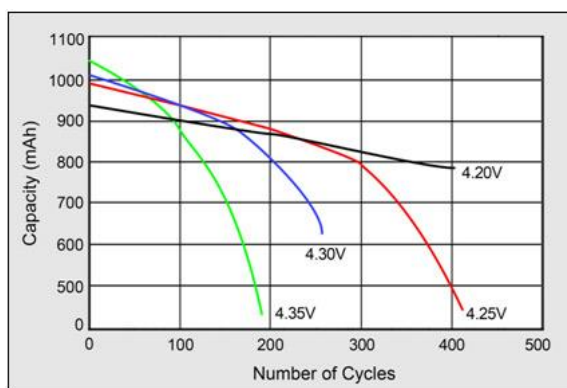


Figura 5.8: Capacitat d'una cel·la en comparació al nombre de cicles de recàrrega a diferents tensions màximes de recàrrega. Font: Battery University [1].

Aquesta degradació s'accentua encara més si es manté el VE en els estats de càrrega màxima i mínima durant un llarg període de temps. És per això que alguns telèfons mòbils han començat a incorporar algorismes que monitoren les recàrregues del telèfon mòbil per part de l'usuari i intenten buscar patrons dels períodes de temps en els que el telèfon està endollat i en procés de recàrrega. Per exemple, la majoria d'usuaris endollen els seus

⁸ Un cicle correspon a una càrrega i descàrrega completa d'una bateria o bé la suma de càrregues i descàrregues parcials que acabin sumant l'energia equivalent descarregada a una descàrrega completa.

telèfons mòbils en el moment d'anar a dormir i no el tornen a desendollar fins a l'endemà al matí quan es desperten. Un cop detectats aquests patrons, i amb l'autorització de l'usuari, realitzen el que en diuen una recàrrega intel·ligent per tal de preservar la vida de la bateria.

L'objectiu de l'usuari en el moment en què endolla el telèfon mòbil no és més que assegurar que, l'endemà al matí, disposarà del 100 % de la seva autonomia. Molt probablement, i si no s'implementa cap sistema que ho eviti, la bateria assolirà aquest estat de càrrega del 100 % molt abans que l'usuari es desperti, de fet, poques hores després que aquest vagi a dormir. Així doncs, si no s'aplica cap mesura, la bateria del telèfon mòbil romandrà recarregada al 100 % durant un període de temps prolongat que pot ser perfectament d'unes quantes hores, tot i no existir cap necessitat per part de l'usuari que el seu mòbil tingui la bateria al 100 %, més enllà de casos molt esporàdics en els que l'usuari modifiqui el seu patró i, per exemple, havent de marxar a mitjanit per qualsevol urgència. Pel fet de que aquest escenari és altament improbable, l'algoritme de recàrrega intel·ligent estudia quines hores passa el telèfon connectat durant la nit i a partir de quina hora en comença a fer-ne ús el seu usuari i programa la recàrrega de tal manera que, un cop assoleix un estat de càrrega del 80 % s'aturi i no es restableixi fins a una hora tal que asseguri que, un cop l'usuari es desperti, tingui la bateria del seu telèfon mòbil al 100 % per tornar-ne a fer ús.

D'aquesta manera s'allarga la vida útil de la bateria sense causar un perjudici a l'usuari, augmentant la seva autonomia diària i fins i tot evitant una possible substitució de la bateria en un futur.

Quelcom similar és el que permeten aplicar de forma manual alguns VE del mercat, especialment els que disposen de bateries de major capacitat, com ara els models del fabricant Tesla (vegeu Figura 5.9). Més enllà dels propis límits que imposa el fabricant pel que fa a les tensions màximes de recàrrega i mínimes de descàrrega, que no són en cap cas modificables per part de l'usuari, alguns VE permeten predefinir un percentatge màxim de recàrrega, és a dir, escollir la tensió màxima que assoliran les cel·les de la bateria del seu VE. Aquest ha de ser un valor de compromís, ja que no ha de penalitzar ni limitar l'ús diari que es fa del VE, però això no acostuma a ser un problema en VE que disposen d'autonomies reals superiors als 300 km, molt per sobre de la distància que recorren diàriament la majoria de conductors amb el seu vehicle privat. D'aquesta manera, l'usuari pot decidir on és el seu límit sense veure perjudicat el seu dia a dia i augmentant la vida útil de la seva bateria.

En el cas que es prevegi realitzar un viatge llarg, es pot modificar fàcilment aquest límit superior per permetre la recàrrega de fins al 100 % de la seva capacitat utilitzable per poder aprofitar així tota la capacitat útil de la bateria del VE.



Figura 5.9. Pantalla de configuració del límit superior de l'estat de càrrega d'un Tesla Model 3.

Font: The Robservatory.

La proposta consistiria a realitzar quelcom similar a la solució aplicada als telèfons mòbils, guardant les distàncies. A partir d'un patró d'ús del VE, establir quines són les necessitats d'ús diari del VE i, tenint en compte els estats de càrrega entre els quals el VE preserva millor la bateria, procurar situar-se en aquests estats de càrrega, amb l'objectiu d'allargar la vida útil de la bateria garantint que no hi haurà cap perjudici per part de l'usuari.

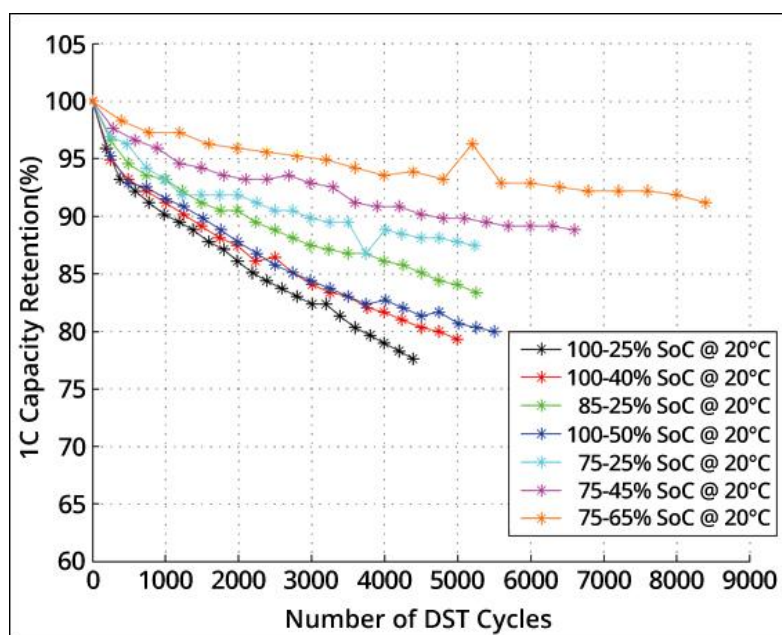


Figura 5.10. SoH d'una bateria en comparació al nombre de cicles de recàrrega amb diferents límits d'estat de càrrega. Font: Xu, Bolun et al., 2019 [14].

A tall d'exemple, el gràfic de la Figura 5.10 representa el SoH d'una cel·la de Li-Ion en relació amb el nombre de cicles de recàrrega per a diferents límits d'estat de càrrega.

Concretament, en aquest cas l'estudi puntualitza que s'ha realitzat a $1C^9$. Si, per exemple, ens fixem en les dades de 100-50@20C, el que significa que s'han realitzat cicles de càrrega i descàrrega a 20 °C i entre un estat de càrrega del 100 % i un del 50 %, veiem que al cap de 5000 cicles la bateria reté un 82 % de la seva capacitat original. Si en canvi aquests cicles es realitzen en les mateixes condicions de temperatura però entre un estat de càrrega del 75 i un del 25 %, al cap de 5000 cicles la bateria reté un 87 % de la seva capacitat original.

En el cas d'un VE amb una autonomia real de 400km, el fet de limitar la recàrrega diària a un estat de càrrega del 75 % implica disposar d'una autonomia de 300 km per a la jornada. Seguint l'exemple anterior, que passat un temps i ús determinats la bateria d'aquest VE tingui un SoH del 82 % suposaria disposar d'una autonomia de 328 km, mentre que si la degradació fos del 87 %, aquesta augmentaria fins als 348 km, és a dir, una diferència de 20 km d'autonomia [14].

Per poder desenvolupar-ho i posar-ho en pràctica, caldria conèixer el perfil de degradació de la bateria del VE entre diferents condicions d'ús, de recàrrega, descàrrega i fins i tot de temperatura, doncs estudis com el presentat només analitzen el cas d'una sola cel·la en condicions de laboratori. Un dels grans avantatges del VE és precisament que la majoria disposen de connexió remota que, més enllà del control de la climatització o de l'autonomia, permeten utilitzar-los com a laboratoris en temps real, monitorant dades de condicions d'ús, temperatures, degradació, etc. al fabricant del VE, que li poden permetre realitzar un estudi a gran escala i en temps real de quines són les condicions òptimes per a les seves bateries, en especial pel que fa a condicions de recàrrega que és el que ens ocupa en aquest cas. Igualment, alguns dels fabricants tenen implementades actualitzacions OTA (*Over-the-Air*) que podrien permetre aplicar millores contínues en referència a temes com aquest a partir de l'estudi de totes aquestes dades recopilades al llarg del temps [1].

⁹ Es coneix com a C-Rate la ràtio de potència de càrrega o descàrrega d'una bateria, calculat segons la fórmula P / E , on P és la potència de càrrega o descàrrega i E la capacitat de la bateria. Un major C-Rate provoca un major estrès i una major degradació d'una bateria. S'expressa com a XC on X és el valor de C-Rate.

Conclusions

Amb la realització d'aquest treball i un cop analitzat l'estat actual i identificades les oportunitats de millora, s'han plantejat i desenvolupat tot un seguit d'algoritmes i propostes per tal d'optimitzar el procés de recàrrega d'un vehicle elèctric des d'un punt de vista econòmic. D'aquesta manera s'han descrit i estudiat un total de quatre metodologies amb diferent nivell de complexitat, amb el denominador comú que totes elles permeten obtenir en menor o major grau el resultat desitjat; una potencial disminució del cost en el procés de recàrrega.

Amb la primera metodologia s'aconsegueixen reduir el cost fix corresponent al terme de potència contractada així com el cost inicial de la instal·lació mitjançant un control dinàmic de la potència disponible.

Amb la segona, s'augmenta la rendibilitat de la inversió i es redueix el temps d'amortització d'una instal·lació fotovoltaica, tot regulant la potència de recàrrega del vehicle elèctric en funció de paràmetres com ara el cost del terme d'energia o l'excedent de potència generada.

La tercera metodologia permet una reducció ostensible del terme d'energia facturat mitjançant un control horari simple de l'inici de la recàrrega.

Amb la quarta metodologia plantejada s'augmenta el grau d'optimització del cost de la recàrrega del vehicle elèctric, millorant els resultats obtinguts en els anteriors algoritmes. Per assolir aquest objectiu es combinen alguns dels conceptes de les metodologies anteriorment plantejades i s'hi incorporen noves eines avançades de predicció de consums al mateix temps que es consideren els preus del terme d'energia per acabar establint un patró òptim de recàrrega.

Pel desenvolupament d'aquestes metodologies, s'han tingut en compte tot un seguit d'hipòtesis basades en dades reals i estadístiques, que han permès arribar a unes propostes factibles, viables i aplicables des d'un punt de vista teoricopràctic. Al mateix temps, s'ha procurat que aquestes no suposessin un compromís ni una càrrega de cara a l'usuari, doncs pretenen ser una ajuda, pel que s'han minimitzat els possibles efectes negatius que podien arribar a implicar.

Aquestes propostes presentades s'han considerat robustes, adequades a un context del mercat de l'energia tant actual com futur i tant nacional com internacional en alguns casos, condicions que suposen una mostra més de la seva viabilitat i sentit d'aplicació.

La major dificultat d'aplicació d'aquestes propostes, especialment pel que fa a les que es podrien considerar més complexes, rau en la necessitat de disposar les eines i els coneixements necessaris per dur a terme la programació dels algoritmes que permetrien implementar les idees presentades. En aquest sentit cal fer menció especial als algoritmes de predicció, que en aquest projecte s'han formulat amb la major senzillesa possible pel fet que escapen de l'abast del treball, tot i conformar un dels elements cabdals d'alguna de les metodologies presentades.

Per últim, aprofitant alguns dels elements utilitzats en les metodologies anteriorment exposades, s'ha fet una proposta d'adequació del procés de recàrrega del vehicle elèctric amb l'objectiu de perllongar la vida útil de la bateria. Aquesta proposta, consistent en un control estudiat dels límits de recàrrega diaris del vehicle elèctric, és perfectament integrable amb les metodologies d'optimització obtingudes, i s'ha plantejat seguint el mateix precepte de tractar de no causar cap perjudici per l'usuari ni incidir en els seus hàbits d'utilització del vehicle. Agraïments

En primer lloc, vull agrair especialment a la meua parella el suport mostrat en tot moment de la realització del projecte, la seva paciència i l'ajuda rebuda per part seva.

També vull agrair a l'Oriol Boix, director del projecte, la seva ràpida resposta mostrant una total predisposició a ajudar en qualsevol moment així com les seves correccions, tant pel que fa al contingut com al redactat del projecte.

6. Bibliografia

- [1] Battery University. (2019). *BU-501: Basics about Discharging*. Recollit de https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/discharge_methods
- [2] Encyclopædia Britannica. (2020). *Early electric automobiles*. Recollit de <https://www.britannica.com/technology/automobile/Early-electric-automobiles>
- [3] Europapress. (2016). Un 11% de los hogares tiene contratada una potencia eléctrica superior a la necesaria, según Heraldo. Recollit de <https://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-11-hogares-tiene-contratada-potencia-electrica-superior-necesaria-heraldo-20161028144624.html>
- [4] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). (2016). *Análisis del consumo energético del sector residencial en España*. Secretaría General. Departamento de Planificación y Estudios.
- [5] INE (Instituto Nacional de Estadística). (2008). *km medios anuales recorridos por los vehículos*. Encuesta de Hogares y Medio Ambiente, Vehículos.
- [6] Jeffrey-Wilensky, J. (2019). *New refillable batteries could fuel an electric car revolution: MACH*. Recollit de <https://www.nbcnews.com/mach/science/new-refillable-batteries-could-fuel-electric-car-revolution-ncna974556>
- [7] Randall, C. (2019). *Nio completes first battery swapping route: electricdrive*. Recollit de <https://www.electrive.com/2019/01/20/nio-completes-first-battery-swapping-route/>
- [8] Red Eléctrica de España (REE). (2020). Recollit de <https://www.esios.ree.es/es>
- [9] Reial decret 1053/2014, de 12 de desembre. (2014). *pel qual s'aprova una nova Instrucció tècnica complementària (ITC) BT 52 «Instal·lacions amb fins especials. Infraestructura per a la recàrrega de vehicles elèctrics», del Reglament electrotècnic per a baixa tensió, aprovat per Reial decret 842/2002*.
- [10] Reial decret 244/2019, de 5 d'abril. (2019). *pel qual es regulen les condicions administratives, tècniques i econòmiques de l'autoconsum d'energia elèctrica*.
- [11] Reial decret llei 1/2019, d'11 de gener. (2019). *de mesures urgents per adequar les competències de la Comissió Nacional dels Mercats i la Competència*

a les exigències derivades del dret comunitari en relació a les directives 2009/72/CE i 2009/73/CE del Parlament Europeu i del Consell.

- [12] U.S. Department of Energy. (2020). *Timeline: History of the Electric Car*.
Recollit de <https://www.energy.gov/timeline/timeline-history-electric-car>
- [13] UNEF (Unión Española Fotovoltaica). (2019). *Posicionamiento de unef respecto a la definición de peajes y cargos de la UNEF*.
- [14] Xu, Bolun et al. (2016). *Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment*.